



Всемирная Метеорологическая Организация

Добро пожаловать

# РУКОВОДСТВО ПО ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

СБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ,  
АНАЛИЗ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И  
ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

WMO-№.168

Всемирная Метеорологическая Организация

РУКОВОДСТВО  
ПО  
ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

Пятое издание  
1994

ВМО-№ 168

СБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ,  
АНАЛИЗ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И  
ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

**© 1994, Всемирная Метеорологическая Организация**

ISBN 92-63-45168-0

#### **ПРИМЕЧАНИЯ**

Издание на русском языке подготовлено в 1997 г.

Употребляемые обозначения и изложение материала в настоящем издании не означают выражения со стороны Секретариата Всемирной Метеорологической Организации какого бы то ни было мнения относительно правового статуса той или иной страны, территории, города или района, или их властей, или относительно делимитации их границ.

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие .....	xxxi
<b>ЧАСТЬ А — ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ</b>	
<b>ГЛАВА 1 — ВВЕДЕНИЕ К РУКОВОДСТВУ .....</b>	<b>1</b>
1.1    Предмет <i>Руководства</i> .....	1
1.2    План и содержание <i>Руководства</i> .....	1
1.3    Перекрестные ссылки между <i>Руководством</i> и <i>Справочным наставлением по ГОМС</i> .....	3
<b>ГЛАВА 2 — ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВМО, СВЯЗАННАЯ С ВОДНЫМИ ПРОБЛЕМАМИ .....</b>	<b>5</b>
2.1    Общий обзор .....	5
2.1.1    Цели и сфера деятельности, связанной с водными проблемами .....	6
2.1.2    Организация программы .....	9
2.1.3    Осуществление программы .....	10
2.1.4    Развитие трудовых ресурсов .....	11
2.1.5    Техническое сотрудничество .....	12
2.2    Международные базы данных .....	12
2.2.1    Информационно-справочная служба по гидрологии (ИНФОГИДРО) ..	12
2.2.2    Глобальный центр данных по стоку (ГЦДС) .....	13
2.2.3    Всемирная информационно-справочная служба климатических данных (ИНФОКЛИМА) .....	14
2.3    Гидрологическая оперативная многоцелевая система (ГОМС) ..	15
2.3.1    Структура ГОМС .....	15
2.3.2    Организация и функционирование ГОМС .....	20
2.4    Деятельность по подготовке кадров в области гидрологии .....	21
Список литературы .....	24
<b>ГЛАВА 3 — ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ СЛУЖБЫ .....</b>	<b>25</b>
3.1    Функции гидрологической службы .....	25
3.1.1    Использование гидрологической информации .....	25
3.1.2    Функции и обязанности гидрологической службы .....	26
3.1.3    Виды данных для потребителей .....	29
3.1.4    Прогнозирование экстремальных явлений в реальном масштабе времени .....	31

3.2	Организация гидрологической и метеорологической служб .....	31
Список литературы .....		33

#### **ГЛАВА 4 — ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ И ПРАВИЛА .....** 35

4.1	Единицы измерения и обозначения .....	35
4.2	Рекомендуемые практика и процедуры .....	35
4.3	Точность гидрологических измерений .....	50
4.3.1	Основные принципы .....	50
4.3.2	Определения терминов, связанных с точностью измерений .....	52
4.3.3	Виды ошибок .....	55
4.3.4	Источники ошибок .....	55
4.3.5	Вторичные ошибки измерения .....	56
4.3.6	Характеристика приборов и методов наблюдений .....	57
4.3.7	Рекомендуемая точность гидрологических измерений .....	58
4.4	Гидрологические коды .....	58
4.4.1	Общие положения .....	58
4.4.2	Типы кодов .....	60
4.4.3	Идентификация гидрологических наблюдательных станций .....	60
4.4.4	Коды BUFR и GRIB .....	61
Список литературы .....		61

#### **ГЛАВА 5 — МЕЖДУНАРОДНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ЗАНИМАЮЩИЕСЯ ПРОБЛЕМАМИ ГИДРОЛОГИИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ .....** 63

5.1	Общие положения .....	63
5.2	Межправительственные организации (МПО) .....	63
5.3	Характер деятельности и взаимодействие организаций системы ООН в вопросах освоения водных ресурсов .....	63
5.4	Соглашения по сотрудничеству между организациями на глобальном, региональном и отраслевом уровнях .....	76
5.5	Неправительственные организации (НПО) .....	77
5.6	Сотрудничество между учреждениями по бассейнам международных рек и озер .....	86
Список литературы .....		86

#### **ЧАСТЬ В — ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОЦЕНOK**

#### **ГЛАВА 6 — ОБЗОР ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ .....** 87

6.1	Гидрологический цикл как объект наблюдений .....	87
6.2	Новые технологии .....	90

*Стр.*

6.2.1	Дистанционное зондирование .....	90
6.2.2	Микроэлектроника .....	91
6.2.3	Микропроцессоры .....	92
6.2.4	Многопараметрические накопители данных .....	92
	Список литературы .....	95
	<b>ГЛАВА 7 — ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ .....</b>	<b>97</b>
7.1	Общие требования .....	97
7.2	Размещение осадкомерных постов .....	97
7.3	Нерегистрирующие осадкомеры .....	100
7.3.1	Общие положения .....	100
7.3.2	Стандартные осадкомеры .....	100
7.3.3	Суммарные осадкомеры .....	101
7.3.4	Методы измерения .....	102
7.3.5	Ошибки и точность отсчетов .....	103
7.3.6	Корректировка систематических ошибок .....	104
7.4	Самопищащие осадкомеры .....	109
7.4.1	Весовой плювиограф .....	109
7.4.2	Поплавковый плювиограф .....	110
7.4.3	Плювиограф с опрокидывающимся судном .....	111
7.4.4	Приборы для записи интенсивности дождевых осадков .....	111
7.4.5	Методы записи .....	112
7.5	Слой выпавшего снега .....	112
7.5.1	Измерение высоты слоя выпавшего снега .....	112
7.5.2	Водный эквивалент снега .....	113
7.6	Применение радиолокаторов для наблюдений за осадками .....	114
7.6.1	Применение радиолокаторов в гидрологии .....	114
7.6.2	Уравнение радиолокации (для осадков) .....	114
7.6.3	Факторы, влияющие на измерения .....	115
7.6.3.1	Вид осадков .....	115
7.6.3.2	Ширина радиолокационного луча .....	115
7.6.3.3	Преломление радиолокационного луча .....	116
7.6.3.4	Ослабляющее влияние атмосферы .....	116
7.6.3.5	Ослабление эхо-сигнала в зависимости от дальности .....	117
7.6.4	Методы и способы регистрации .....	117
7.6.4.1	Фотографические методы .....	117
7.6.4.2	Ручные методы .....	118
7.6.4.3	Автоматические методы .....	119
7.6.5	Доплеровский радиолокатор .....	119
7.7	Наблюдения за осадками при помощи спутников .....	120
7.8	Роса .....	121

*Стр.*

7.9	Взятие проб осадков для определения их качества .....	123
7.9.1	Коллекторы для отбора проб .....	123
7.9.1.1	Дождевые коллекторы .....	123
7.9.1.2	Коллекторы для взятия проб снега .....	124
7.9.1.3	Сбор сухих осаждений .....	124
	Список литературы .....	124
<b>ГЛАВА 8 — СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ .....</b>		125
8.1	Общие положения .....	125
8.2	Снегомерные маршруты .....	125
8.2.1	Точки измерения .....	126
8.2.2	Снаряжение для взятия проб снега .....	127
8.2.3	Процедуры взятия проб .....	130
8.2.4	Точность измерений .....	130
8.3	Высота и площадь снежного покрова .....	131
8.3.1	Измерения с помощью снегомерных реек .....	131
8.3.2	Измерения с помощью снегомерного цилиндра .....	131
8.3.3	Измерения при помощи фотограмметрических методов .....	132
8.4	Измерение снежного покрова с помощью радиоактивных изотопов .....	132
8.4.1	Вертикальные радиоизотопные снегомеры .....	133
8.4.2	Горизонтальные радиоизотопные снегомеры .....	133
8.5	Снегомерные подушки .....	134
8.6	Использование естественного гамма-излучения .....	135
8.6.1	Гамма-съемка снежного покрова с самолета .....	135
8.6.2	Наземная гамма-съемка .....	136
8.7	Измерение водного эквивалента снежного покрова при помощи космической радиации .....	137
	Список литературы .....	137
<b>ГЛАВА 9 — ИСПАРЕНИЕ И СУММАРНОЕ ИСПАРЕНИЕ .....</b>		139
9.1	Общие положения .....	139
9.2	Водные испарители .....	139
9.3	Почвенные испарители и лизиметры .....	141
9.4	Испарение со снега .....	142
9.5	Косвенные методы .....	143
9.5.1	Общие положения .....	143
9.5.2	Солнечная радиация .....	143
9.5.3	Длинноволновая радиация .....	143
9.5.4	Температура воздуха .....	144
9.5.5	Температура поверхности воды .....	144
9.5.6	Влажность воздуха или упругость водяного пара .....	145
9.5.7	Ветер .....	146

9.5.8	Интегрирующие устройства .....	146
	Список литературы .....	146
<b>ГЛАВА 10 — УРОВНИ ВОДЫ РЕК, ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ .....</b>		147
10.1	Общие положения .....	147
10.2	Устройства для измерения уровня воды .....	147
10.2.1	Устройства для визуальных отсчетов уровня .....	147
10.2.2	Самописцы уровня .....	148
10.3	Порядок измерения уровня воды .....	149
10.3.1	Нуль графика водомерного поста .....	149
10.3.2	Самописцы уровня .....	149
10.3.3	Эксплуатация самописцев уровня в зимних условиях .....	149
10.4	Частота измерений уровня воды .....	150
	Список литературы .....	150
<b>ГЛАВА 11 — ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ.....</b>		151
11.1	Общие положения .....	151
11.2	Измерение расхода воды при помощи гидрометрических вертушек .....	151
11.2.1	Выбор створа .....	152
11.2.2	Измерение площади поперечного сечения .....	152
11.2.3	Измерение скорости течения .....	154
11.2.3.1	Вертушки для измерения скорости .....	154
11.2.3.2	Измерение скорости при помощи гидрометрической вертушки .....	154
11.2.3.3	Определение средней скорости на вертикали .....	155
11.2.4	Расчет расхода воды .....	157
11.2.5	Измерение расхода воды под ледяным покровом .....	158
11.2.5.1	Выбор створа .....	158
11.2.5.2	Оборудование .....	159
11.2.5.3	Измерение расхода воды .....	159
11.2.5.4	Расчет расхода воды .....	160
11.2.6	Точность измерений .....	160
11.3	Измерение расхода воды с помощью поплавков .....	161
11.3.1	Выбор створов .....	161
11.3.2	Поплавки .....	161
11.3.3	Порядок измерений .....	161
11.3.4	Расчет скорости течения .....	162
11.3.5	Расчет расхода воды .....	162
11.4	Измерение расхода методом смешения.....	162
11.4.1	Общие требования .....	163
11.4.2	Выбор участка .....	163

*Стр.*

11.4.3	Трасеры и оборудование для их обнаружения .....	164
11.4.4	Расчет расхода воды .....	164
11.5	Определение расчетного уровня воды .....	165
11.6	Расчет расхода воды косвенными методами .....	165
11.6.1	Общие положения .....	165
11.6.2	Полевое обследование .....	166
11.6.3	Определение расхода воды по уклону и площади поперечного сечения .....	166
11.6.4	Измерение расхода воды в трубах .....	166
11.6.5	Измерение расхода воды в местах сжатия потока .....	167
11.6.6	Измерение расхода воды на плотинах и дамбах .....	167
11.7	Измерение расхода воды в трудных условиях .....	167
11.7.1	Неустойчивое русло .....	168
11.7.2	Горные реки .....	169
11.7.3	Измерение расхода при неустановившемся движении воды .....	169
11.7.3.1	Измерение расхода во время паводков .....	169
11.7.3.2	Измерение расхода на участках с приливно-отливными явлениями .....	170
11.7.4	Водная растительность в руслах рек .....	173
11.8	Нетрадиционные методы измерения расхода воды .....	174
11.8.1	Общие положения .....	174
11.8.2	Метод движущегося судна .....	174
11.8.3	Ультразвуковой (акустический) метод .....	175
11.8.4	Электромагнитный метод .....	176
	Список литературы .....	177
<b>ГЛАВА 12 — ГИДРОМЕТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ .....</b>		179
12.1	Назначение гидрометрических станций .....	179
12.2	Выбор участка .....	179
12.3	Контроль связи между уровнем и расходом .....	180
12.4	Измерительные сооружения .....	181
12.4.1	Типы сооружений .....	181
12.4.2	Выбор типа сооружения .....	182
12.4.3	Измерение напора .....	182
12.4.4	Эксплуатация измерительных сооружений .....	183
12.5	Зависимость между уровнем и расходом .....	183
12.5.1	Устойчивость зависимости между уровнем и расходом .....	184
12.5.2	Частота измерений расхода воды .....	185
	Список литературы .....	185
<b>ГЛАВА 13 — РАСХОД НАНОСОВ .....</b>		187
13.1	Общие положения .....	187

13.2	Выбор створа .....	187
13.3	Измерение расхода взвешенных наносов .....	187
13.3.1	Приборы для взятия проб и измерительные устройства .....	187
13.3.2	Порядок измерений .....	188
13.3.3	Определение концентрации наносов .....	189
13.3.4	Расчет расхода взвешенных наносов .....	190
13.3.5	Непрерывный учет расхода взвешенных наносов .....	190
13.4	Измерение расхода донных наносов .....	191
13.4.1	Приборы .....	191
13.4.2	Порядок измерения .....	192
13.4.3	Расчет расхода донных наносов .....	193
13.4.4	Непрерывный учет расхода донных наносов .....	194
	Список литературы .....	194
	<b>ГЛАВА 14 — ЛЕД НА РЕКАХ, ОЗЕРАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ</b> .....	195
14.1	Общие положения .....	195
14.2	Элементы ледового режима .....	195
14.3	Методы наблюдений .....	195
14.4	Сроки и частота наблюдений .....	196
14.5	Точность измерений .....	196
	Список литературы .....	196
	<b>ГЛАВА 15 — ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ</b> .....	197
15.1	Общие положения .....	197
15.2	Гравиметрический метод .....	197
15.2.1	Метод отбора проб .....	198
15.2.2	Описание пробоотборников .....	199
15.2.2.1	Ручной бур .....	199
15.2.2.2	Трубчатые или колонковые буры .....	199
15.2.3	Лабораторные исследования .....	200
15.3	Метод электросопротивления .....	200
15.4	Нейтронный метод .....	201
15.4.1	Приборы .....	201
15.4.2	Обсадные трубы .....	201
15.4.3	Тарирование .....	202
15.4.4	Измерения и их точность .....	202
15.5	Гамма-абсорбционный метод .....	203
15.6	Дизелектрические методы .....	203
15.6.1	Метод временного рефлектометра .....	204
15.6.2	Емкостной метод .....	205
15.7	Методы дистанционного зондирования .....	205
15.8	Тензиометрический метод .....	207

*Стр.*

Список литературы .....	209
<b>ГЛАВА 16 — ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ .....</b>	<b>211</b>
16.1     Общие положения .....	211
16.2     Установка наблюдательных скважин .....	212
16.3     Испытание наблюдательных скважин .....	217
16.4     Закупорка и заполнение заброшенных скважин .....	219
16.5     Приборы и методы наблюдений .....	221
16.5.1     Ручные приборы .....	221
16.5.2     Автоматические самопищащие приборы .....	223
16.5.3     Устройства для отбора проб воды из безнасосных скважин .....	226
16.5.4     Регистраторы солености и температуры воды .....	227
16.6     Мониторинг качества подземных вод .....	227
Список литературы .....	229
<b>ГЛАВА 17 — КАЧЕСТВО ВОДЫ .....</b>	<b>231</b>
17.1     Общие положения .....	231
17.2     Методы отбора проб .....	231
17.2.1     Виды проб .....	231
17.2.1.1     Грейферные пробы .....	231
17.2.1.2     Составные пробы .....	232
17.2.2     Отбор репрезентативных проб воды .....	232
17.2.3     Оборудование и методика отбора проб в полевых условиях .....	233
17.2.3.1     Грейферные пробоотборники .....	233
17.2.3.2     Пробоотборники для проб на растворенный кислород .....	236
17.2.3.3     Автоматические пробоотборники .....	236
17.2.3.4     Влияние местоположения станции и времени года на порядок отбора проб .....	237
17.3     Подготовка к выезду в поле .....	238
17.3.1     Общая подготовка .....	238
17.3.2     Определение объема пробы .....	238
17.3.3     Перечень контрольных мероприятий перед полевыми работами .....	238
17.4     Фильтрация и способы консервации проб в полевых условиях .....	239
17.4.1     Фильтрация .....	239
17.4.2     Способы консервации .....	240
17.4.2.1     Емкости для проб .....	240
17.4.2.2     Добавление химических веществ .....	241
17.4.2.3     Замораживание .....	241
17.4.2.4     Охлаждение .....	241
17.4.2.5     Практические аспекты консервации .....	242
17.5     Измерения в полевых условиях .....	242

17.5.1	Автоматический мониторинг .....	242
17.5.2	Параметры, измеряемые в полевых условиях .....	242
17.5.2.1	Измерение pH .....	243
17.5.2.2	Измерение электропроводности .....	244
17.5.2.3	Измерение растворенного кислорода .....	245
17.5.2.4	Измерение температуры .....	246
17.5.2.5	Измерение мутности .....	246
17.5.2.6	Измерение цвета воды .....	247
17.5.2.7	Измерение прозрачности .....	248
17.5.2.8	Общее резюме полевых измерений .....	248
17.6	Измерение радиоактивности .....	248
17.6.1	Источники радиоактивности в воде .....	248
17.6.2	Отбор и консервация проб .....	249
17.7	Отбор проб для биологического анализа .....	250
17.7.1	Микробиологический анализ .....	250
17.7.2	Макробиота .....	251
17.8	Биохимическая потребность в кислороде .....	252
17.8.1	Методы измерения .....	253
17.8.2	Точность измерения .....	256
	Список литературы .....	256
	<b>ГЛАВА 18 — УСЛОВИЯ СОБЛЮДЕНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ .</b>	257
18.1	Общая практика .....	257
18.2	Меры безопасности на гидрометрических станциях с самописцами .....	257
18.2.1	Подходы к постам .....	257
18.2.2	Платформы .....	257
18.2.3	Колодцы .....	258
18.3	Меры предосторожности при работе с мостов .....	258
18.3.1	Опасность со стороны транспорта .....	258
18.3.2	Опасность со стороны подвесного оборудования .....	259
18.4	Меры безопасности во время проведения измерений вброд .....	259
18.4.1	Общие положения .....	259
18.4.2	Оценка ситуации .....	259
18.4.3	Применение спасательных жилетов .....	259
18.4.4	Меры безопасности при использовании каната или размеченного троса .....	259
18.4.5	Методика перехода вброд .....	260
18.4.6	Поведение в случае падения .....	260
18.4.7	Ответственность .....	260
18.5	Меры предосторожности при работе с лодок .....	260
18.5.1	Общие положения .....	260

*Стр.*

18.5.2	Спасательные жилеты и средства безопасности .....	261
18.5.3	Применение канатов .....	261
18.5.4	Использование шлюпок .....	261
18.6	Меры безопасности при работе с канатных переправ .....	262
18.7	Меры предосторожности при работе с ручным оборудованием .....	263
18.7.1	Топографическая съемка .....	263
18.7.2	Цепные пилы .....	263
18.7.3	Электрооборудование .....	263
18.7.4	Электроинструменты .....	263
18.7.5	Защитная одежда и средства защиты .....	264
18.7.6	Радиоактивное оборудование .....	264
18.7.7	Вопросы безопасности при наблюдении за подземными водами .....	264
18.8	Меры предосторожности при работе с химикалиями .....	264
18.9	Специальные меры предосторожности в условиях холода .....	265
18.9.1	Гипотермия (переохлаждение) .....	265
18.9.2	Обморожение .....	266
18.9.3	Работа на льду рек и озер .....	267
18.9.4	Работа в горных районах .....	267
18.9.5	Выживание в холодной воде .....	268
18.10	Специальные меры предосторожности в жарких условиях .....	268
18.10.1	Тепловой удар (гипертермия) .....	268
18.10.2	Обгорание на солнце .....	269
18.11	Передвижение и транспорт .....	269
18.11.1	Общие положения .....	269
18.11.2	Вертолеты .....	269
18.11.3	Моторизованный транспорт .....	270
18.12	Набор для выживания и неприкосновенный запас .....	270
18.13	Другие виды опасности .....	270
	Список литературы .....	271

## **ЧАСТЬ С — СБОР, ОБРАБОТКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

<b>ГЛАВА 19 — РОЛЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ .....</b>	<b>273</b>	
19.1	Информационные системы .....	273
19.2	Компьютерная технология .....	276
19.3	Персонал и его подготовка .....	276
	Список литературы .....	277

**ГЛАВА 20 — ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ .....**

20.1	Общая концепция проектирования сети .....	279
20.1.1	Определение проекта сети .....	280
20.1.2	Другие подходы.....	282
20.1.3	Основная сеть .....	282
20.1.3.1	Минимальная сеть .....	283
20.1.3.2	Расширение информационной базы .....	283
20.1.4	Проект комплексной сети.....	285
20.1.4.1	Станции для оперативных целей .....	285
20.1.4.2	Реперные станции .....	286
20.1.4.3	Репрезентативные бассейны .....	286
20.1.5	Проведение анализа сети .....	286
20.2	Плотность станций минимальной сети .....	288
20.2.1	Минимальная плотность для климатологических станций .....	290
20.2.1.1	Осадкомерные посты .....	290
20.2.1.2	Снегомерная съемка .....	292
20.2.1.3	Испарительные станции .....	292
20.2.2	Минимальная плотность гидрометрических станций .....	293
20.2.2.1	Гидрометрические станции .....	293
20.2.2.2	Уровень воды в реке.....	295
20.2.2.3	Уровень воды в озерах и водохранилищах .....	295
20.2.2.4	Сток наносов и седиментация .....	295
20.2.2.5	Станции наблюдений за качеством воды .....	296
20.2.2.6	Температура воды .....	296
20.2.2.7	Ледяной покров рек и озер .....	297
20.3	Наблюдения за подземными водами .....	297
20.4	Особые требования к качеству воды .....	299
20.4.1	Параметры качества воды .....	301
20.4.2	Качество поверхностных вод .....	301
20.4.3	Качество осадков .....	305
20.4.4	Качество отложений .....	308
20.4.5	Качество подземных вод .....	309
	Список литературы .....	310

**ГЛАВА 21 — СБОР ДАННЫХ .....**

21.1	Выбор участка .....	311
21.2	Идентификация станции .....	311
21.2.1	Идентификация участков сбора данных.....	311
21.2.2	Описательная информация .....	315
21.2.2.1	Описание станции .....	315
21.2.2.2	Подробный план расположения станции.....	318

*Стр.*

21.2.2.3	Карта .....	319
21.2.2.4	Координаты .....	319
21.2.2.5	Порядок описания .....	320
21.3	Частота и время посещения станций .....	320
21.3.1	Неавтоматические станции .....	320
21.3.2	Автоматические станции .....	321
21.4	Обслуживание участков наблюдений .....	322
21.5	Наблюдения .....	323
21.5.1	Неавтоматические станции .....	323
21.5.2	Автоматические станции .....	325
21.5.3	Передача информации в реальном масштабе времени .....	326
21.5.4	Дополнительные инструкции для наблюдателей .....	326
21.6	Системы передачи информации .....	327
21.6.1	Общие положения .....	327
21.6.2	Системы связи .....	328
21.6.3	Факторы, влияющие на выбор системы передачи информации..	329
21.7	Мониторинг качества воды .....	330
21.7.1	Идентификация станции .....	330
21.7.2	Полевые бланки для мониторинга качества воды .....	330
21.7.3	Транспортировка проб на качество воды.....	330
21.7.4	Обеспечение качества полевых работ при мониторинге качества воды .....	331
21.8	Сбор специальных данных .....	334
21.8.1	Предъявляемые требования .....	334
21.8.2	Дополнительные измерения ливневых осадков .....	334
21.8.3	Данные от метеорологических радиолокаторов и спутников ...	334
21.8.4	Экстремальные уровни и расходы воды в реке .....	335
	Список литературы .....	335
<b>ГЛАВА 22 — ПРОВЕРКА И КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ</b>	.....	337
22.1	Контроль качества и обнаружение ошибок .....	337
22.1.1	Инспекция станций .....	337
22.1.2	Предварительная проверка данных .....	338
22.1.3	Обнаружение ошибок .....	339
22.1.4	Результаты контроля качества .....	341
22.2	Методы проверки достоверности данных .....	341
22.2.1	Общие методы .....	342
22.2.2	Комбинированные методы .....	343
22.2.3	Специальные процедуры уточнения данных .....	347
22.2.3.1	Климатологические данные .....	348
22.2.3.2	Данные о количестве осадков .....	348
22.2.3.3	Данные о снеге и льде .....	349

22.2.3.4	Данные об уровне воды .....	349
22.2.3.5	Данные гидрометрических станций .....	351
22.2.3.6	Данные о качестве воды .....	351
22.2.3.7	Данные о наносах .....	354
22.2.4	Пропуски в данных .....	355
22.3	Кодирование данных .....	355
22.3.1	Коды местоположения.....	356
22.3.2	Коды переменных (параметров) .....	356
22.3.3	Коды квалификации данных .....	362
22.3.4	Коды пропусков в данных .....	362
22.3.5	Коды передачи данных .....	363
	Список литературы .....	363
	<b>ГЛАВА 23 — ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ .....</b>	<b>365</b>
23.1	Общие положения .....	365
23.2	Ввод данных .....	367
23.2.1	Ввод с клавиатуры .....	367
23.2.2	Обработка лент самописцев .....	369
23.2.3	Неавтоматические станции с использованием телеметрии.....	370
23.2.4	Данные автоматических станций .....	371
23.2.4.1	Бумажные ленты и кассеты для записи данных .....	372
23.2.4.2	Память на жестких дисках .....	373
23.3	Процедуры обработки .....	374
23.3.1	Общие процедуры первичной обработки .....	374
23.3.2	Особые процедуры первичной обработки.....	377
23.3.2.1	Климатологические данные .....	378
23.3.2.2	Наблюдения за испарением и эвапотранспирацией .....	379
23.3.2.3	Данные об осадках.....	379
23.3.2.4	Данные о речном стоке .....	380
23.3.2.5	Данные о качестве воды .....	384
	Список литературы .....	385
	<b>ГЛАВА 24 — ХРАНЕНИЕ И ПОИСК ДАННЫХ .....</b>	<b>387</b>
24.1	Архивация первичных данных .....	387
24.2	Хранение и оперативное использование обработанной информации .....	387
24.2.1	Общие положения .....	387
24.2.2	Контроль за потоком информации .....	389
24.2.3	Обновление данных .....	389
24.2.4	Уплотнение и точность данных .....	391
24.2.5	Физическая организация файла .....	393
24.2.6	Логическая организация файла .....	394

*Стр.*

24.2.7	Извлечение данных с одной переменной .....	396
24.2.8	Сравнение возможностей хранения данных в управляемом и автономном режимах .....	397
24.3	Поиск данных .....	400
	Список литературы .....	402

## **ГЛАВА 25 — РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДАННЫХ.....** 403

25.1	Общие положения .....	403
25.2	Каталоги информации .....	404
25.3	Краткие сводки .....	406
25.4	Публикация данных .....	409
25.4.1	Назначение .....	409
25.4.2	Периодичность публикаций .....	410
25.4.3	Содержание и формат.....	410
25.5	Магнитные носители информации .....	413
25.5.1	Ленты .....	414
25.5.2	Магнитные диски .....	415
25.5.3	Лазерные диски .....	416
25.6	Форматы обмена данными в реальном масштабе времени .....	416
	Список литературы .....	417

## **ЧАСТЬ D — ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

	<b>ГЛАВА 26 — ВВЕДЕНИЕ В ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.....</b>	419
26.1	Методы анализа, применяемые в гидрологии .....	419
26.2	Содержание части D .....	420

	<b>ГЛАВА 27 — ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ .....</b>	421
27.1	Использование частотного анализа в гидрологии .....	421
27.2	Статистические ряды и периоды повторяемости .....	421
27.3	Математический подход к частотному анализу .....	423
27.3.1	Распределения вероятностей, используемые в гидрологии.....	423
27.3.2	Оценка параметров .....	423
27.3.3	Однородность данных .....	424
	Список литературы .....	425

	<b>ГЛАВА 28 — ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОЖДЕВЫХ ОСАДКОВ .....</b>	427
28.1	Повторяемость дождевых осадков .....	427
28.1.1	Осадки в точке .....	427
28.1.1.1	Приведение данных к одному расчетному периоду .....	427

28.1.1.2	Косвенная оценка повторяемости дождевых осадков в точке .....	428
28.1.1.3	Максимальные наблюденные осадки .....	433
28.1.2	Распространение осадков по площади .....	433
28.1.3	Обобщенные карты .....	434
28.1.4	Засуха .....	434
28.2	Интенсивность дождевых осадков .....	435
28.2.1	Осадки в точке .....	435
28.2.2	Распределение осадков по площади .....	437
	Список литературы .....	437
	<b>ГЛАВА 29 — АНАЛИЗ ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ .....</b>	439
29.1	Общие положения .....	439
29.2	Интегральные кривые .....	439
29.3	Анализ зависимости между продолжительностью, площадью охвата и слоем осадков .....	440
29.4	Максимально возможные осадки (МВОС) .....	441
29.4.1	Методы расчета МВОС .....	441
29.4.2	Предварительные оценки .....	443
29.4.3	Выбор расчетной продолжительности дождевых осадков .....	443
29.4.4	Выбор бассейнов притоков .....	444
29.4.5	Транспозиция данных о ливнях .....	444
29.4.6	Выбор и анализ наиболее сильных ливней .....	445
29.4.7	Максимизация выбранных ливней .....	446
29.4.8	Распределение ливневых осадков по территории .....	446
29.4.9	Региональная совместимость оценок .....	447
29.4.10	Методы расчета при отсутствии данных .....	447
	Список литературы .....	449
	<b>ГЛАВА 30 — ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ОБ ОСАДКАХ .....</b>	451
30.1	Общие положения .....	451
30.2	Корректировка данных .....	451
30.2.1	Стандартный период наблюдений .....	452
30.2.2	Анализ по кривой связи двух последовательностей (двойная интегральная кривая) .....	453
30.2.3	Расчет недостающих данных .....	454
30.3	Распределение по площади .....	455
30.3.1	Применение карт изогиет .....	455
30.3.2	Оценка физико-географических факторов .....	455
30.4	Расчет средних по площади осадков .....	457
30.4.1	Среднее арифметическое .....	457
30.4.2	Метод многоугольников .....	457
30.4.3	Метод изогиет .....	458

*Стр.*

30.4.4	Метод процентов от нормы .....	459
30.4.5	Гипсометрический метод .....	459
Список литературы .....		460
<b>ГЛАВА 31 — АНАЛИЗ ТАЛОГО СТОКА .....</b>		461
31.1	Общие положения .....	461
31.2	Теория снеготаяния в точке .....	461
31.3	Расчет снеготаяния на водосборе при отсутствии дождя .....	465
31.4	Расчет снеготаяния на водосборе при выпадении дождя .....	468
31.5	Оценка интенсивности водоотдачи .....	469
31.6	Испарение с поверхности снежного покрова .....	471
31.7	Вероятные максимальные осадки и снеготаяние .....	472
31.7.1	Введение .....	472
31.7.2	Максимально возможное снегонакопление .....	472
31.7.3	Расчеты снеготаяния .....	473
31.8	Оценка стока при коротких периодах снеготаяния .....	474
31.8.1	Равнинные районы .....	474
31.8.2	Горные территории .....	474
Список литературы .....		475
<b>ГЛАВА 32 — ОЦЕНКА ДАННЫХ О РЕЧНОМ СТОКЕ .....</b>		477
32.1	Общие положения .....	477
32.2	Увязка данных .....	477
32.3	Пространственное распределение речного стока .....	478
32.3.1	Карты среднегодового стока .....	479
32.3.2	Вычисление среднего стока по данным об осадках и температуре воздуха .....	479
32.3.3	Корреляция между показаниями отдельных станций .....	482
32.3.4	Эффективная продолжительность ряда наблюдений .....	484
Список литературы .....		484
<b>ГЛАВА 33 — ВЗАИМОСВЯЗИ ОСАДКИ—СТОК .....</b>		487
33.1	Общие положения .....	487
33.2	Объемы стока .....	487
33.2.1	Индекс предшествующего увлажнения .....	487
33.2.2	Исходный базисный сток как показатель объема стока .....	490
33.2.3	Методы, учитывающие влажность почвы .....	491
33.3	Распределение речного стока во времени .....	492
33.3.1	Единичный гидрограф .....	493
33.3.1.1	Построение единичного гидрографа по гидрометрическим данным .....	493

33.3.1.2	Построение единичного гидрографа с помощью синтетических методов .....	496
33.3.1.3	Пересчет единичного гидрографа для различной продолжительности дождя .....	497
33.3.2	Метод изохрон .....	498
33.4	Модели с распределенными параметрами .....	500
	Список литературы .....	500
<b>ГЛАВА 34 — ТРАНСФОРМАЦИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ В РУСЛОВОЙ СЕТИ .....</b>		501
34.1	Общие положения .....	501
34.2	Гидродинамические методы .....	501
34.2.1	Полный метод .....	501
34.2.2	Диффузия и кинематический расчет .....	504
34.3	Гидрологические методы .....	504
34.4	Трансформация расходов воды водохранилищем .....	506
	Список литературы .....	507
<b>ГЛАВА 35 — АНАЛИЗ НИЗКОГО СТОКА И ЗАСУХ .....</b>		509
35.1	Общие положения .....	509
35.2	Кривые продолжительности стока .....	509
35.3	Повторяемость низкого стока .....	511
35.4	Статистический анализ гидрологических засух .....	512
35.5	Анализ кривых истощения .....	513
	Список литературы .....	515
<b>ГЛАВА 36 — ПОВТОРЯЕМОСТЬ ПАВОДКА .....</b>		517
36.1	Анализ данных наблюдений .....	517
36.1.1	Максимальный сток .....	517
36.1.2	Статистический анализ гидрографов паводков .....	518
36.2	Обобщение характеристик паводков по району .....	519
36.2.1	Метод индекса паводков .....	519
36.2.2	Методика, основанная на регрессии .....	520
	Список литературы .....	522
<b>ГЛАВА 37 — ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ С ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ .....</b>		525
37.1	Общие положения .....	525
37.2	Метод водного баланса .....	525
37.2.1	Приток и отток .....	526
37.2.2	Осадки .....	526
37.2.3	Фильтрация и береговое регулирование .....	526

*Стр.*

37.2.4	Изменение запаса воды в водохранилище .....	526
37.3	Метод теплового баланса .....	526
37.3.1	Отраженная длинноволновая радиация .....	527
37.3.2	Радиация, излучаемая поверхностью водохранилища .....	528
37.3.3	Изменение запаса тепла .....	528
37.3.4	Тепло, затрачиваемое на испарение .....	529
37.3.5	Тепло, поступающее к водной массе или теряющееся по посредством турбулентного обмена .....	529
37.3.6	Тепло, теряющееся с испаряющейся водой .....	530
37.3.7	Теплообмен между водной массой и дном водохранилища .....	530
37.3.8	Испарение .....	530
37.4	Аэродинамические подходы .....	530
37.4.1	Значения коэффициента $N$ .....	532
37.4.2	Ветер .....	534
37.4.3	Температура поверхности воды .....	534
37.4.4	Влажность воздуха или упругость водяного пара .....	534
37.4.5	Метод вихревой (турбулентной) диффузии .....	534
37.5	Совместное решение уравнений аэродинамики и теплового баланса .....	535
37.6	Экстраполяция данных водных испарителей .....	538
	Список литературы .....	542

## ГЛАВА 38 — ОЦЕНКА СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ С РЕЧНОГО БАССЕЙНА .....

38.1	Общие положения .....	545
38.2	Потенциальное суммарное испарение .....	545
38.3	Действительное суммарное испарение .....	546
38.4	Метод водного баланса .....	546
38.4.1	Осадки .....	546
38.4.2	Речной сток .....	546
38.4.3	Изменение влагозапасов .....	547
38.4.4	Глубокое просачивание .....	547
38.5	Метод теплового баланса .....	547
38.6	Аэродинамический метод .....	547
38.7	Метод Пенмана—Монтейта .....	548
38.8	Метод Пристли—Тейлора (радиационный метод) .....	548
38.9	Дополнительный метод .....	549
	Список литературы .....	549

## ГЛАВА 39 — МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....

39.1	Общие положения .....	551
------	-----------------------	-----

39.2	Модели типа «черного ящика» (системный подход) .....	552
39.3	Концептуальные модели .....	554
39.3.1	Модель Гидрометцентра бывшего СССР .....	554
39.3.2	Модель Сакраменто .....	556
39.3.3	Резервуарная модель (танк-модель) .....	558
39.3.4	Выбор моделей .....	561
39.4	Гидродинамические модели .....	561
39.5	Оценка параметров .....	565
39.6	Стохастическое моделирование гидрологических временных рядов .....	566
39.6.1	Марковские модели 1-го порядка .....	566
39.6.2	Авторегрессионные модели со скользящим средним (ARMA) ..	567
39.6.3	Модели дробного гауссовского шума и нелинейных процессов .	568
39.7	Моделирование качества воды .....	568
39.7.1	Общие положения .....	568
39.7.2	Типы моделей.....	569
39.7.3	Модели переноса загрязнения в реках .....	570
39.7.4	Применение и примеры.....	571
39.8	Выбор моделей .....	572
	Список литературы .....	573

## **ГЛАВА 40 — ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

40.1	Общие положения .....	577
40.2	Системы координат .....	577
40.3	Измерения в точке .....	578
40.4	Проблемы линейности .....	579
40.4.1	Водоток .....	579
40.4.2	Речная сеть .....	579
40.4.3	Профиль водотока .....	581
40.4.4	Речная сеть.....	582
40.4.5	Поперечное сечение .....	582
40.4.6	Физические характеристики .....	583
40.5	Измерения площадей .....	583
40.5.1	Бассейн .....	583
40.5.2	Координатная сетка .....	589
40.6	Измерения объема .....	589
40.6.1	Батиметрические методы .....	590
40.6.2	Топографические методы.....	590
40.7	Географические информационные системы .....	590
	Список литературы .....	591

*Стр.*

## ЧАСТЬ Е—ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

### ГЛАВА 41—ВВЕДЕНИЕ В ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ .....

41.1	Общие положения .....	593
41.2	Характеристики прогнозов .....	593
41.3	Эффективность гидрологических прогнозов .....	596
41.3.1	Точность и своевременность прогнозов .....	596
41.3.2	Издержки и экономическая эффективность гидрологических прогнозов .....	597
41.4	Служба гидрологического прогнозирования.....	601
41.4.1	Организация .....	601
41.4.2	Деятельность .....	602
41.5	Распространение прогнозов и предупреждений .....	603

### ГЛАВА 42—ТРЕБОВАНИЯ К ДАННЫМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫМ В ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗАХ.....

42.1	Общие положения .....	605
42.2	Данные, используемые для разработки метода прогноза .....	605
42.2.1	Гидрологические переменные .....	606
42.2.2	Характеристики водосборов .....	606
42.2.3	Характеристики рек .....	607
42.3	Данные, необходимые для выпуска прогноза .....	607
42.3.1	Осадки .....	607
42.3.2	Снег .....	608
42.3.3	Уровни воды и речной сток .....	608
42.3.4	Другие требования к данным .....	608
42.4	Использование метеорологических прогнозов .....	609
42.5	Точность наблюдений и частота измерений .....	609
42.6	Получение оперативных данных .....	609
42.6.1	Сети .....	609
42.6.2	Дистанционное зондирование .....	612
42.6.2.1	Радиолокатор .....	613
42.6.2.2	Методы, основанные на использовании спутниковой информации .....	614
42.6.2.3	Зондирование с борта воздушного судна .....	616
42.6.3	Системы связи .....	617
42.6.3.1	Спутник .....	618
42.6.3.2	Метеорный разряд .....	619
	Список литературы .....	619

<b>ГЛАВА 43 — МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ .....</b>	621
43.1      Общие положения .....	621
43.2      Корреляция и регрессия .....	622
43.3      Показатель увлажненности .....	624
43.4      Прогнозирование максимальных уровней воды .....	624
43.5      Прогнозы стока на основании учета запасов воды в бассейне .....	626
43.6      Прогнозирование истощения стока .....	627
43.7      Концептуальные модели речного стока .....	627
43.8      Расчет гидрографа стока .....	628
43.9      Анализ временных рядов .....	629
43.10     Методы корректировки прогноза .....	629
43.11     Вероятностный подход в прогнозировании .....	631
Список литературы .....	632
<b>ГЛАВА 44 — ПРОГНОЗЫ ПАВОДКОВ И ВОДОСНАБЖЕНИЯ .....</b>	635
44.1      Общие положения .....	635
44.2      Прогнозирование паводка .....	635
44.3      Мгновенные паводки .....	636
44.3.1     Общие положения .....	636
44.3.1.1   Программы подготовки прогноза .....	637
44.3.1.2   Системы предупредительных сигналов .....	637
44.3.1.3   Сводки и предупреждения .....	638
44.3.1.4   Мгновенные паводки и качество воды .....	638
44.3.2     Затопление городских территорий .....	638
44.3.3     Прорыв плотин .....	639
44.4      Штормовые нагоны в реках .....	640
44.5      Прогнозы водоснабжения .....	641
44.6      Низкий сток .....	642
Список литературы .....	644
<b>ГЛАВА 45 — ПРОГНОЗЫ ТАЛОГО СТОКА .....</b>	647
45.1      Общие положения .....	647
45.2      Процессы формирования талого стока на равнинных и горных реках .....	647
45.3      Прогностические модели .....	648
45.3.1     Методы индексов .....	648
45.3.2     Концептуальные модели .....	650
45.3.3     Расширенный прогноз речного стока .....	650
45.3.4     Входные данные .....	652
45.4      Кратко- и среднесрочные прогнозы талого стока .....	652
45.5      Долгосрочные прогнозы талого стока .....	652

*Стр.*

45.6	Прогнозы сезонного талого стока в равнинных районах .....	653
45.7	Прогнозы сезонного талого стока в горных районах .....	654
Список литературы .....		655

## **ГЛАВА 46—ПРОГНОЗЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ВСКРЫТИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА .....**

46.1	Общие положения .....	657
46.2	Прогнозы формирования льда .....	657
46.3	Прогнозы вскрытия водных объектов .....	660
46.3.1	Прогнозы вскрытия льда на водохранилищах .....	661
46.3.2	Прогнозы вскрытия льда на реках .....	661
46.4	Долгосрочные ледовые прогнозы .....	662
46.4.1	Формирование ледяного покрова .....	662
46.4.2	Разрушение ледяного покрова .....	662
46.4.3	Использование индекса атмосферной циркуляции .....	663
Список литературы .....		663

## **ЧАСТЬ F—ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИИ В ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

### **ГЛАВА 47—ВВЕДЕНИЕ К ПРИМЕНЕНИЮ ГИДРОЛОГИИ В ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ .....**

47.1	Общие положения .....	665
47.2	Цель водохозяйственного проекта .....	665
47.3	Многоцелевые проекты .....	666
47.4	Системы водных ресурсов .....	666
47.5	Предварительные исследования в целях водохозяйственного проектирования .....	667
Список литературы .....		670

### **ГЛАВА 48—УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА .**

48.1	Общие положения .....	671
48.2	Меняющийся характер ресурсов .....	671
48.2.1	Естественные изменения .....	671
48.2.2	Изменения, вызванные человеком .....	672
48.3	Меняющиеся подходы к управлению водным хозяйством .....	672
48.3.1	Управление водосбором .....	674
48.3.2	Раздробленное управление .....	675
48.4	Информационные программы по водным ресурсам .....	675
48.4.1	Оценочные данные о будущих потребностях в воде .....	675
48.4.2	Характер и релевантность сети станций .....	677
48.4.3	Выбор стратегии создания сети .....	678
48.5	Заключение .....	679

Список литературы .....	680
<b>ГЛАВА 49 — КАЧЕСТВО ВОДЫ И ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ .....</b> 681	
49.1    Общие положения .....	681
49.2    Связь между количеством и качеством воды .....	681
49.2.1    Ручьи и реки .....	681
49.2.2    Большие озера и водохранилища .....	683
49.3    Влияние водохозяйственных проектов на качество воды ручьев и рек .....	684
49.3.1    Плотины и запруды .....	684
49.3.2    Работы по регулированию речных русел .....	685
49.3.3    Изъятия стока и переброски .....	685
49.4    Влияние водохозяйственных проектов на качество вод крупных озер и водохранилищ .....	686
49.5    Изменение качества воды под влиянием сброса загрязняющих веществ .....	686
49.5.1    Эвтрофикация .....	686
49.5.2    Органические вещества и самоочищение .....	687
49.5.3    Адсорбция и аккумуляция загрязняющих веществ .....	688
49.5.4    Тепловое загрязнение .....	688
49.6    Меры по снижению влияния загрязняющих веществ на качество воды .....	688
49.6.1    Предупредительные меры .....	689
49.6.2    Нейтрализующие меры .....	689
Список литературы .....	690
<b>ГЛАВА 50 — ОЦЕНКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ .....</b> 691	
50.1    Общие положения .....	691
50.2    Необходимость оценки водных ресурсов .....	691
50.3    Использование информации о водных ресурсах .....	692
50.4    Виды информации о водных ресурсах .....	693
50.5    Компоненты Программы по оценке водных ресурсов .....	696
50.6    Оценка деятельности в рамках Программы по оценке водных ресурсов .....	698
Список литературы .....	700
<b>ГЛАВА 51 — ОЦЕНКА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ .....</b> 701	
51.1    Общие положения .....	701
51.2    Водопользование .....	702
51.2.1    Городское водоснабжение .....	703
51.2.2    Хозяйственно-бытовое водопользование .....	703
51.2.3    Коммерческое водопользование .....	704

*Стр.*

51.2.4	Орошение .....	704
51.2.5	Животноводство .....	705
51.2.6	Промышленность .....	705
51.2.7	Тепловая энергетика .....	706
51.2.8	Уменьшение загрязнения вод .....	706
51.2.9	Рекреация, эстетическое и традиционное использование вод .....	706
51.2.10	Охрана рыб, животного и растительного мира .....	707
51.2.11	Судоходство .....	707
51.2.12	Регулирование паводочного стока .....	707
Список литературы .....		707

## **ГЛАВА 52—ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА**

52.1	Общие положения .....	709
52.2	Оценка потерь воды из поверхностных водных систем .....	710
52.2.1	Природа потерь .....	710
52.2.2	Потери с орошаемых территорий .....	711
52.2.3	Испарение с водохранилищ .....	711
52.2.4	Фильтрация из водохранилища .....	712
52.3	Влияние местоположения водохранилища .....	712
52.4	Влияние осаждения наносов .....	712
52.5	Последовательный анализ .....	713
52.5.1	Численные методы .....	713
52.5.2	Графические методы .....	715
52.6	Вероятностные методы .....	716
52.6.1	Строгие методы .....	717
52.6.2	Приближенные методы .....	718
52.7	Связь объема водохранилища с величиной забора воды и надежностью работы .....	720
52.8	Многоцелевые водохранилища .....	721
52.9	Системы водохранилищ .....	722
52.10	Побочные эффекты от сооружения водохранилищ .....	723
52.10.1	Влияние на гидравлический и гидрологический режимы .....	723
52.10.2	Влияние на окружающую среду .....	723
52.11	Определение максимальных уровней воды водохранилища .....	724
52.11.1	Ветровой нагон .....	724
52.11.2	Волны, вызванные ветром .....	724
52.11.3	Периодические колебания поверхности .....	725
Список литературы .....		726

<b>ГЛАВА 53 — ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАВОДКОВ .....</b>	729
53.1     Общие положения .....	729
53.2     Расчетные паводки и их типы .....	730
53.2.1     Величина паводка и методы расчета .....	730
53.2.2     Период, на который проектируется сооружение .....	731
53.2.3     Расчетные паводки для больших водохранилищ .....	731
53.2.4     Максимальный возможный паводок (МВП) .....	732
53.2.5     Стандартный проектный паводок (СПП) .....	733
53.3     Подготовка данных .....	733
53.4     Методы определения расчетного паводка .....	734
53.4.1     Эмпирические методы .....	735
53.4.2     Детерминированные модели .....	735
53.4.3     Вероятностные методы .....	736
Список литературы .....	738
<b>ГЛАВА 54 — УМЕНЬШЕНИЕ ОПАСНОСТИ ПАВОДКОВ .....</b>	739
54.1     Общие положения .....	739
54.2     Водохранилища, регулирующие паводочный сток .....	739
54.2.1     Задачи проектирования .....	739
54.2.1.1     Регулируемая емкость для задержания паводка .....	740
54.2.1.2     Нерегулируемая емкость для задержания паводка водохранилищ речного типа .....	741
54.2.1.3     Нерегулируемая емкость для задержания паводка водохранилищ приречного типа .....	741
54.2.2     Учет режима эксплуатации водохранилищ для проектных целей .....	742
54.2.3     Дополнительные соображения, касающиеся противопаводочных водохранилищ .....	742
54.2.3.1     Временной интервал между последовательными паводками ..	742
54.2.3.2     Влияние отложения наносов .....	743
54.2.3.3     Влияние развития хозяйственной деятельности .....	743
54.3     Другие меры, связанные со строительством сооружений .....	743
54.3.1     Забор воды .....	743
54.3.2     Преобразование русел .....	744
54.3.3     Дамбы и защитные стенки .....	744
54.4     Мероприятия, не связанные со строительством сооружений .....	745
54.4.1     Регулирование пойм .....	745
54.4.2     Предупреждения о паводках .....	746
54.5     Проектирование водоотводящих систем в городах и на небольших водосборах в сельской местности .....	746

*Стр.*

54.5.1	Особенности дренажных систем .....	746
54.5.2	Расчетные расходы на выходе дренажных систем .....	747
54.6	Влияние на гидрологический цикл .....	748
	Список литературы .....	749
<b>ГЛАВА 55 — ОРОШЕНИЕ И ОСУЩЕНИЕ .....</b>		751
55.1	Орошение .....	751
55.1.1	Потребности в воде сельскохозяйственных культур .....	751
55.1.1.1	Метод Бланея—Кридла .....	752
55.1.1.2	Почвенная влага .....	753
55.1.1.3	Качество воды .....	754
55.1.2	Потери воды .....	754
55.2	Осушение сельскохозяйственных земель .....	755
55.2.1	Определение .....	755
55.2.2	Факторы, воздействующие на осушение .....	755
55.2.3	Эффективность осушения сельскохозяйственных земель .....	757
55.2.4	Основные виды осушения .....	757
55.2.4.1	Рельефный дренаж .....	757
55.2.4.2	Перехватывающий дренаж .....	758
55.2.5	Способы искусственного осушения .....	758
55.2.5.1	Поверхностное осушение .....	758
55.2.5.2	Подповерхностное осушение .....	758
55.2.6	Экономические факторы .....	759
	Список литературы .....	760
<b>ГЛАВА 56 — ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ .....</b>		761
56.1	Общие положения .....	761
56.2	Гидроэнергетика .....	761
56.2.1	Преимущества .....	762
56.2.2	Потенциал участка .....	763
56.2.3	Диспетчерский график .....	767
56.2.4	Качество воды .....	769
56.3	Сопутствующие энергетические проекты .....	769
56.3.1	Производство энергии с использованием ископаемого и ядерного топлива .....	769
56.3.2	Добыча и переработка угля .....	773
56.3.3	Добыча и переработка урана .....	774
56.3.4	Производство нефтяных продуктов .....	774
56.3.5	Производство метанола .....	774
	Список литературы .....	775

**ГЛАВА 57 — СУДОХОДСТВО И РЕГУЛИРОВАНИЕ  
РЕЧНОГО РУСЛА .....**

57.1	Применение гидрологии для судоходства .....	777
57.1.1	Применение гидрологических данных для характеристики фарватера .....	777
57.1.1.1	Геометрические показатели .....	779
57.1.1.2	Гидрологические показатели .....	780
57.1.1.3	Гидравлические показатели .....	783
57.1.2	Применение гидрологических данных для обслуживания судоходства .....	783
57.1.2.1	Сбор данных .....	784
57.1.2.2	Прогнозирование .....	785
57.1.2.3	Передача данных и прогнозов .....	785
57.1.3	Судоходство на озерах и каналах .....	786
57.2	Применение гидрологических данных для русловыправительных работ .....	786
57.2.1	Эволюция и характерные черты речных излучин .....	787
57.2.2	Определение расчетных расходов и уровней .....	789
57.2.2.1	Определение расчетного расхода для противопаводочного выправления русла .....	789
57.2.2.2	Определение расчетного расхода для выправления русел среднего размера .....	789

**ГЛАВА 58 — УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ НА  
УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ .....**

58.1	Общие положения .....	793
58.2	Городской ливневый дренаж .....	794
58.3	Моделирование дождевых осадков, стока и систем ливневого дренажа .....	795
	Список литературы .....	796

**ГЛАВА 59 — ПЕРЕНОС НАНОСОВ И ДЕФОРМАЦИЯ  
РЕЧНЫХ РУСЕЛ .....**

59.1	Общие положения .....	797
59.2	Эрозия на речных водосборах .....	797
59.3	Русловая эрозия .....	798
59.4	Перемещение наносов в каналах .....	798
59.4.1	Перенос взвешенных наносов .....	798
59.4.2	Перенос донных наносов .....	799
59.5	Отложение наносов .....	800
59.6	Меры по регулированию стока наносов .....	802
	Список литературы .....	802
	Указатель .....	805



## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Одна из задач Всемирной Метеорологической Организации заключается в содействии стандартизации метеорологических и гидрологических наблюдений и обеспечении единства при публикации данных наблюдений и результатов их статистической обработки. С этой целью Всемирный Метеорологический Конгресс принял *Технический регламент*, в котором сформулированы метеорологическая и гидрологическая практика и правила, которых следует придерживаться странам-членам ВМО. *Регламент* дополняется рядом *Руководств*, в которых более подробно излагаются практические приемы, правила и методические указания, рекомендуемые для использования и выполнения странами-членами ВМО при разработке и принятии мер в соответствии с *Техническим Регламентом* в их деятельности по развитию и эксплуатации метеорологических и гидрологических служб в своих странах.

В основе настоящей публикации лежат решения первой сессии Комиссии ВМО по гидрологии (Вашингтон, 1961 г.), которая признала крайнюю необходимость в подготовке руководства по гидрологической практике. Первое издание было опубликовано в 1965 году под названием *Руководство по гидрометеорологической практике*.

Второе и третье издания *Руководства* были соответственно опубликованы в 1970 и 1974 годах. Третье издание было переименовано в *Руководство по гидрологической практике* в связи с пониманием более широких границ его содержания. Пересмотр и существенные дополнения к *Руководству* были одобрены на пятой сессии Комиссии (Оттава, 1976 г.), что сделало необходимым публикацию четвертого издания в двух томах. В первом томе рассматривались вопросы, связанные с получением и обработкой данных, а во втором томе — вопросы анализа, прогнозирования и иного использования гидрологической информации. Первый и второй том четвертого издания были соответственно опубликованы в 1981 и 1983 годах.

На восьмой сессии Комиссии (Женева, 1988 г.) был одобрен план пятого издания *Руководства*, где в качестве основы частично использованы главы четвертого издания, которые подразделены на главы с собственным списком литературных источников. Было решено, что в каждой главе должна освещаться одна гидрологическая переменная или гидрологическая проблема, и выражено мнение, что такое обобщение будет легко использовать для консультаций, будущих исправлений при переиздании и для перекрестных ссылок на *Справочное наставление*.

по ГОМС. Настоящее издание *Руководства* состоит из шести частей, в которых содержится 59 глав, публикуемых в одном томе. Кроме настоящей версии на русском языке, *Руководство* издается также на английском, испанском и французском языках. Так же, как и в предшествующих версиях, несколько стран-членов ВМО приняли участие в переводе данного *Руководства* на их родные языки.

Цель *Руководства по гидрологической практике* состоит в информации всех работающих в области гидрологии о существующей практике, методах наблюдений и оборудовании, необходимых для их успешной деятельности. Полное изложение теоретических основ и всего спектра применений гидрологических методов выходит за рамки основных задач настоящего *Руководства*. Однако, в случае необходимости, даются ссылки на необходимую литературу.

Надеемся, что *Руководство* будет использоваться не только в гидрологической и метеорологической службах, но также в различных организациях по всему миру, которые занимаются мониторингом водных ресурсов и их оценкой. Все, кто пользуется этим *Руководством*, могут направлять свои замечания и предложения по его дальнейшему совершенствованию в адрес Генерального секретаря.

Я с большим удовольствием выражая благодарность от имени Всемирной Метеорологической Организации более чем сорока экспертам со всего мира, которые внесли свой вклад в подготовку настоящего издания *Руководства*. Особую благодарность выражая г-ну М. Ропе (Франция) и г-ну А. Р. Перксу (Канада) за их усилия по составлению начального проекта и за редактирование части В; г-ну А. Холлу и г-ну Б. Стюарту (Австралия) за редактирование части С; д-ру Ф. Баллоту (Бельгия), д-ру С. Зевину (США) и д-ру В. Р. Шнейдеру (США) соответственно за редактирование частей D, E и F. В связи с подготовкой новых материалов, мы выражаем глубокую благодарность г-ну М. Норманду (Франция) за главу 15 (измерение влажности почвы); д-ру П. Пilonу (Канада) за главу 36 (повторяемость паводка); д-ру Г. Янгу и г-ну А. Перксу (Канада) за главу 48 (устойчивое развитие водного хозяйства) и д-ру Л. Годе (Венгрия) за главу 57 (судоходство и регулирование речного русла). Особую признательность хочется выразить д-ру М. Моссу (США) за его помощь в подготовке окончательного варианта публикации и д-ру О. Старосользскому (Венгрия) за его руководство на протяжении всего периода подготовки настоящего издания *Руководства*.

Г. О. П. Обаси  
Генеральный секретарь

# ЧАСТЬ А

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### ГЛАВА 1

#### ВВЕДЕНИЕ К РУКОВОДСТВУ

##### 1.1 Предмет Руководства

Гидрология представляет собой науку, изучающую формирование и распространение вод на Земле, включая их химические, биологические и физические свойства, и их взаимодействие с окружающей средой. Она является основой при решении практических проблем, связанных с наводнениями и засухой, эрозией и отложением наносов, а также с загрязнением вод. Кроме того, постоянно возрастающее значение загрязнения поверхностных и подземных вод, кислотные дожди, осушение заболоченных земель и другие виды землепользования, а также угроза нарушения естественных водных ресурсов в результате изменения климата и подъема уровня моря выдвинули гидрологию на ведущую роль при решении многих проблем, связанных с окружающей средой.

В настоящем Руководстве рассматриваются эти и некоторые другие аспекты гидрологического цикла, причем особое внимание уделено исследованиям атмосферной и материковой фаз круговорота воды в природе. Естественно, данное Руководство в первую очередь посвящено тем аспектам гидрологии и водных ресурсов, которые входят в сферу деятельности Всемирной Метеорологической Организации и призвано помочь в этих направлениях национальным гидрологическим службам и другим организациям. В соответствии с изложенным, в Руководстве рассматриваются следующие основные элементы гидрологического цикла, связанные с движением и пополнением воды:

- a) осадки;
- b) снежный покров (распределение, высота, плотность, водный эквивалент);
- c) уровень воды (рек, озер, водохранилищ, грунтовых вод в колодцах и скважинах);
- d) речной сток, расход наносов и качество поверхностных вод;
- e) испарение и эвапотранспирация (суммарное испарение);
- f) влажность почвы;
- g) подземные воды, включая их качество.

##### 1.2 План и содержание Руководства

В течение последних десятилетий международная деятельность в области гидрологии получила интенсивное развитие. Помимо программ Организации Объединенных Наций и ее специализированных учреждений, имеются многочисленные двусторонние

программы помощи по гидрологии, и нередко в отдельных странах эти программы взаимно перекрываются. Все это обусловило необходимость подготовки международных руководящих материалов и правил, и можно надеяться, что настоящее *Руководство* поможет выполнить эту задачу. В целях соответствия всем этим требованиям проводится непрерывная работа по расширению и обновлению *Руководства*. *Руководство* состоит из шести частей:

- Часть: А      Общие положения — главы с 1 по 5;
- В      Гидрологические приборы и методы наблюдений и оценок — главы с 6 по 18;
- С      Сбор, обработка и распространение гидрологических данных — главы с 19 по 25.
- Часть: D      Гидрологический анализ — главы с 26 по 40;
- Е      Гидрологическое прогнозирование — главы с 41 по 46;
- F      Применение гидрологии в водном хозяйстве — главы с 47 по 59.

В главах 1–5 (часть А) представлена информация общего характера, касающаяся деятельности ВМО и других международных организаций, связанной с водными проблемами, а также информация о стандартах и правилах ВМО в области гидрологии и основных функциях и обязанностях национальных гидрологических служб.

В главах 6–25 (части В и С), посвященных приборам и методам наблюдений, проектированию сетей, сбору, обработке и публикации данных, излагаются различные практические приемы и методы, которым предлагается следовать странам-членам ВМО при организации национальных гидрологических служб и в их дальнейшей деятельности. Особенно это должно быть полезно для стран, в которых гидрологические сети организуются и эксплуатируются многими государственными ведомствами и агентствами, а также частными предприятиями. Указанные главы перекрывают, до некоторой степени, материал, представленный в других руководствах ВМО, но в данном *Руководстве* упор делается на работы, связанные с исследованием и использованием водных ресурсов. Следует ожидать, что *Руководством* будут пользоваться не только гидрологические службы, но и другие организации; поэтому было решено, что оно должно быть по своему содержанию настолько полным, чтобы не требовалось многочисленные ссылки на другие руководства ВМО.

В главах с 26 по 59 (части D, Е и F) излагаются методы гидрологического анализа и прогнозирования, даются примеры применения гидрологии при решении водохозяйственных проблем. В то время как в отношении приборов, методов наблюдений и публикации данных уже достигнут определенный уровень стандартизации (и ожидается дальнейший прогресс), в отношении анализа и практического применения гидрологии дело обстоит значительно хуже. Поэтому описываются альтернативные подходы к решению различных задач — подходы,

целесообразность и практичность которых проверена на практике. Задача состояла в том, чтобы обратить внимание на то, что имеется несколько различных методов, охарактеризовать каждый из них и отметить его преимущества и недостатки, а не рекомендовать какой-либо один метод в ущерб всем остальным. Большое число обуславливающих факторов (особенности гидрологического и метеорологического режима, наличие исходных данных и информации, поставленные задачи и т. д.) исключает возможность давать правильные рекомендации без ясного представления конкретной ситуации. Всевозрастающее распространение в последние годы персональных компьютеров позволило ввести более точные методы анализа сложных гидрологических проблем. Поскольку некоторые из этих методов уже получили широкое признание, они включены в настоящее *Руководство*.

Как уже упоминалось, при распределении материала по главам возникла необходимость в некоторых повторениях, и часть материала оказалась пригодной для помещения в двух и более главах. Например, не существует четкого разграничения понятий «обработка данных» и «анализ данных». Если публикуются месячные карты изогиет, то их можно рассматривать как обработанные данные об осадках. При других обстоятельствах составление карты изогиет является этапом анализа гидрологических данных для установления зависимости стока от осадков с целью ее использования при гидрологическом прогнозировании. Аналогичная трудность возникает в связи с определенными гидрологическими и климатологическими элементами. Была сделана попытка уменьшить подобные затруднения при изложении материала путем перекрестных ссылок на главы.

Подробное изложение теоретических основ различных методов и детальное обсуждение областей их применения выходит за рамки данного *Руководства*. По этим вопросам читатель найдет в тексте ссылки на соответствующие справочники и технические отчеты ВМО, а также на другие учебные пособия и ведомственные издания. Списки литературы, в том числе справочной, приводятся в конце каждой главы.

### 1.3      *Перекрестные ссылки между Руководством и Справочным наставлением по ГОМС*

Для облегчения пользования перекрестными ссылками на *Справочное наставление (СНГ) по Гидрологической оперативной многоцелевой системе (ГОМС)*, раздел 2.3, ссылки (в квадратных скобках) на соответствующий подраздел СНГ, при необходимости, поставлены справа от названия разделов *Руководства*.



## ГЛАВА 2

### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВМО, СВЯЗАННАЯ С ВОДНЫМИ ПРОБЛЕМАМИ

#### 2.1           **Общий обзор**

Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО), членами которой состоят около 172 государств и территорий, является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций (ООН). В соответствии со статьей 2 Конвенции ВМО [1], основными целями Организации являются:

- a) облегчать всемирное сотрудничество в создании сети станций, проводящих метеорологические наблюдения, а также гидрологические и другие геофизические наблюдения, относящиеся к метеорологии, и способствовать созданию и поддержанию центров, на обязанности которых лежит обеспечение метеорологического и других видов обслуживания;
- b) содействовать созданию и поддержанию систем быстрого обмена метеорологической и другой соответствующей информацией;
- c) содействовать стандартизации метеорологических и других соответствующих наблюдений и обеспечить единообразное издание данных наблюдений и статистических данных;
- d) содействовать дальнейшему применению метеорологии в авиации, судоходстве, при решении водных проблем, в сельском хозяйстве и в других областях деятельности человека;
- e) содействовать деятельности в области оперативной гидрологии и дальнейшему тесному сотрудничеству между метеорологическими и гидрологическими службами;
- f) поощрять научно-исследовательскую работу и работу по подготовке кадров в области метеорологии и, в соответствии с необходимостью, в других смежных областях, а также содействовать координации этой деятельности в международном масштабе.

Структура Организации включает:

- a) Всемирный Метеорологический Конгресс, являющийся высшим органом ВМО. Один раз в четыре года он созывает делегатов всех стран-членов для определения общих направлений деятельности по выполнению целей Организации;
- b) Исполнительный Совет, состоящий из тридцати шести директоров национальных метеорологических или гидрометеорологических служб.

- Исполнительный Совет обычно проводит сессии, по крайней мере, один раз в год для претворения в жизнь программ, принятых Конгрессом;
- c) шесть региональных ассоциаций (Африка, Азия, Южная Америка, Северная и Центральная Америка, Юго-Западная часть Тихого океана и Европа), состоящих из членов Организации, метеорологическая сеть которых полностью или частично находится в одном регионе, обязанностью которых является координировать работу в области метеорологии и соответствующих областях в своих регионах;
  - d) восемь технических комиссий, состоящих из технических экспертов, назначенных странами-членами, для изучения вопросов, входящих в сферу их компетенции. (Были учреждены технические комиссии по основным системам, приборам и методам наблюдений, атмосферным наукам, авиационной метеорологии, сельскохозяйственной метеорологии, морской метеорологии, гидрологии и климатологии);
  - e) Секретариат, который служит в качестве административного и информационного центра Организации. Персонал Секретариата готовит, редактирует, издает и распространяет публикации Организации, выполняет обязанности, определенные Конвенцией и другими основными документами, а также обеспечивает техническую поддержку работе вышеописанных органов, входящих в состав ВМО.

На рисунке 2.1 представлена организационная структура ВМО, а на рисунке 2.2 изображены шесть региональных ассоциаций.

### ***2.1.1        Цели и сфера деятельности, связанной с водными проблемами***

В соответствии с вышеупомянутой статьей 2(е) Конвенции, деятельность в области оперативной гидрологии осуществляется с помощью Программы по гидрологии и водным ресурсам (ПГВР). Эта программа призвана содействовать гидрологическим службам стран-членов ВМО в решении проблем оперативной гидрологии, а также в смягчении последствий стихийных бедствий, связанных с водой, например наводнений и засух. Она также призвана содействовать сотрудничеству между государствами на региональном и субрегиональном уровнях, включая вопросы образования и подготовки кадров в области оперативной гидрологии, особенно там, где речные бассейны находятся на территории нескольких стран.

Основной сферой деятельности ПГВР является оперативная гидрология, которая в соответствии с Общим регламентом ВМО (см. также [2]), включает следующую деятельность:

- a) измерение основных гидрологических элементов на сетях метеорологических и гидрологических станций: сбор, передача, обработка, хранение, поиск и публикация основных гидрологических данных;
- b) составление гидрологических прогнозов;
- c) разработка и усовершенствование соответствующих методов, процедур и методик в:

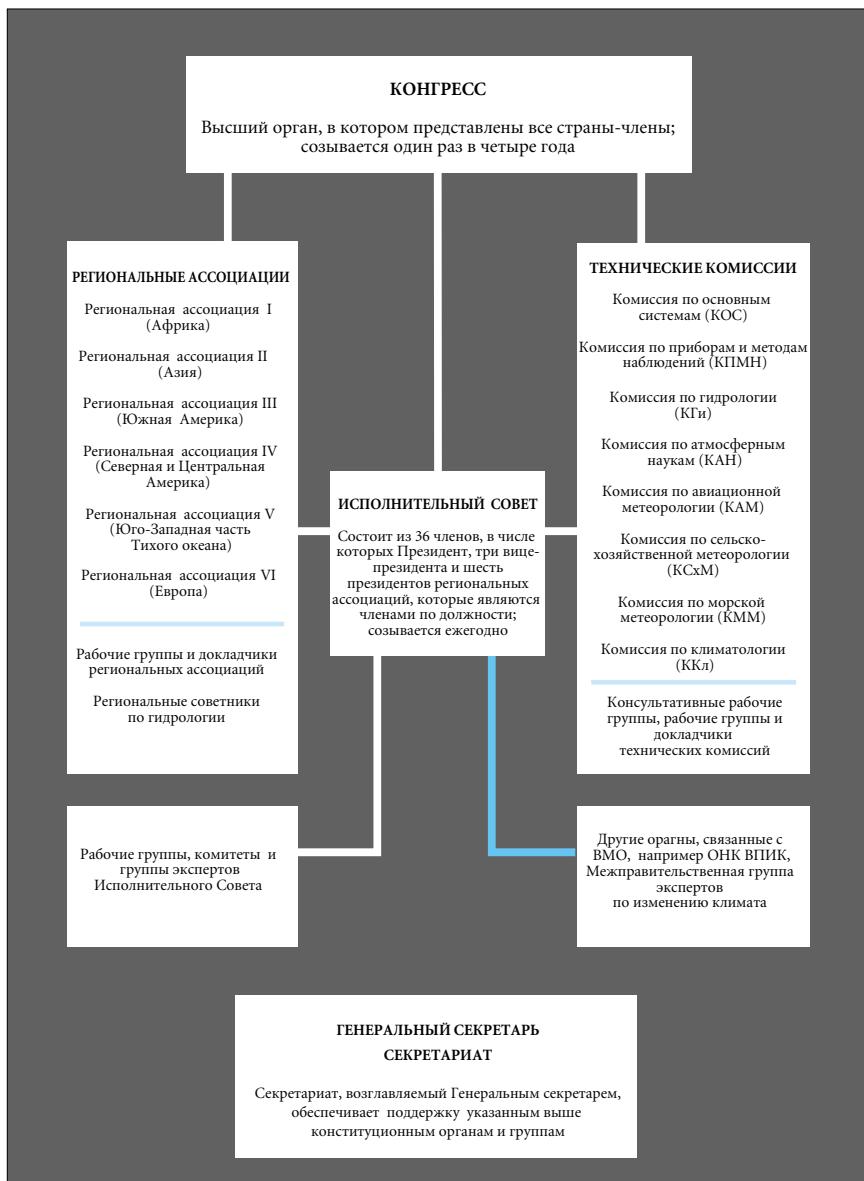


Рисунок 2.1 — Организационная структура Всемирной Метеорологической Организации

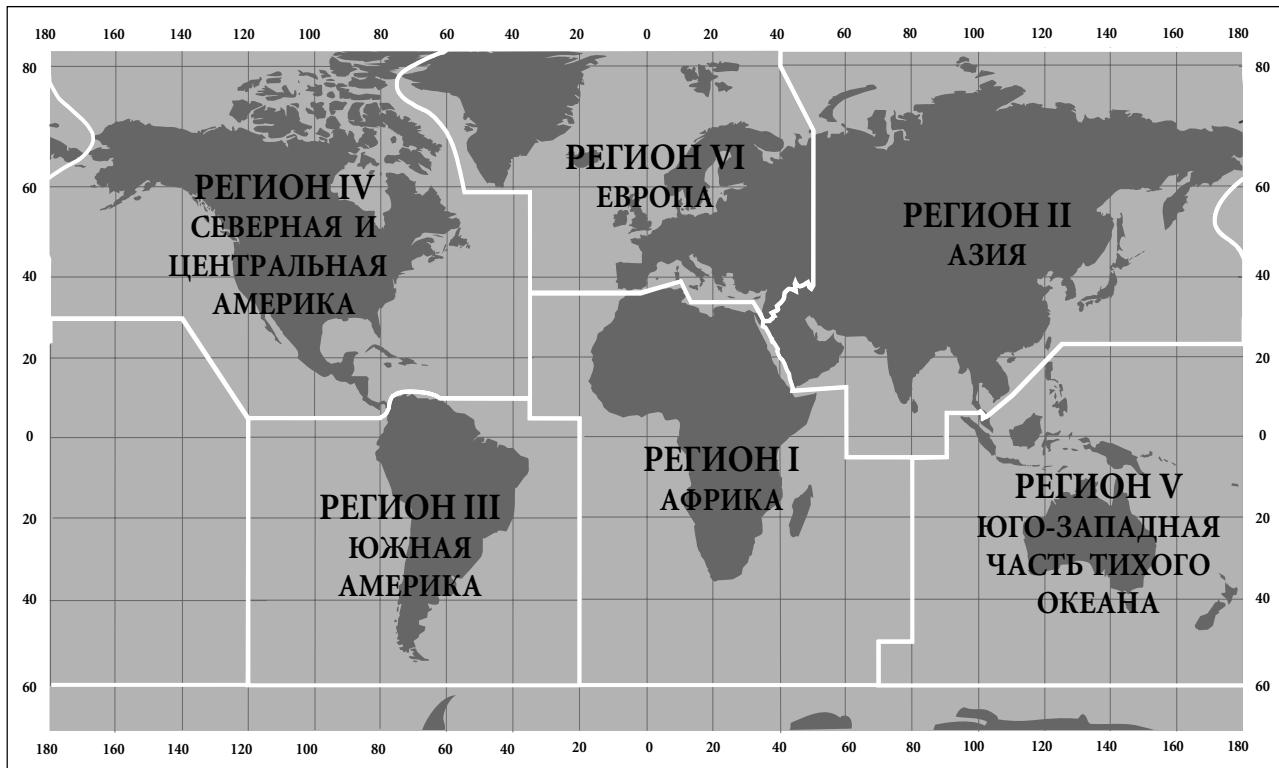


Рисунок 2.2 — Границы регионов ВМО

- i) организации сети;
- ii) спецификации приборов и методов наблюдений;
- iii) стандартизации приборов и методов наблюдений;
- iv) передаче и обработке данных;
- v) предоставлении метеорологических и гидрологических данных для инженерных целей;
- vi) составлении гидрологических прогнозов.

Следует отметить, что здесь под гидрологическими данными понимаются данные о количестве и качестве подземных и поверхностных вод. Поэтому оперативная гидрология тесно связана с оценкой водных ресурсов.

В настоящее время основной задачей ПГВР, которая записана в Третьем долгосрочном плане ВМО (1992–2001 гг.) [3], является следующее:

«Обеспечить оценку и прогнозирование количества и качества водных ресурсов в целях: удовлетворения потребностей всех секторов общества, уменьшения воздействий неблагоприятных явлений, связанных с водными ресурсами, и сохранения или улучшения условий глобальной окружающей среды».

Эта цель соответствует рекомендациям Конференции ООН по водным ресурсам (Мар-дель-Плата, 1977 г.) [5] и Международной конференции по водным ресурсам и окружающей среде (Дублин, январь 1992 г.) [4].

Программа по гидрологии и водным ресурсам (ПГВР) тесно связана с другими программами ВМО, составной частью которых являются проблемы гидрологии, например Программа по тропическим циклонам (ПТЦ) и Всемирная климатическая программа (ВКП). Кроме этого, значительная часть технического сотрудничества ВМО осуществляется в области оперативной гидрологии и финансируется преимущественно через ПРООН. Выполнение региональных проектов в рамках ПГВР, главным образом, обеспечивается шестью региональными рабочими группами по гидрологии, которые действуют при региональных ассоциациях ВМО. Программа по гидрологии и водным ресурсам тесно связана и вносит существенный вклад в деятельность многих других международных программ, включая программы ЮНЕСКО, ЮНЕП, ВОЗ, ФАО и региональных экономических комиссий ООН.

Международное десятилетие ООН по уменьшению опасности стихийных бедствий (МДУОСБ, 1990–1999 гг.) [6] предусматривает существенную ответственность ВМО, поскольку она играет ведущую роль в решении проблемы таких опасных природных явлений, как тропические циклоны, наводнения и засухи.

### 2.1.2 *Организация программы*

Программа по гидрологии и водным ресурсам является одной из основных программ ВМО и состоит из трех взаимно поддерживающих друг друга программных компонентов:

*Программа по оперативной гидрологии (ПОГ) — основные системы*

- Она сосредоточена на основах организации, деятельности и развитии гидрологических служб и включает разработку, проверку, стандартизацию и модернизацию гидрологических приборов и методов сбора и хранения информации по водным ресурсам (количество и качество поверхностных и подземных вод), а также развития трудовых ресурсов. Через Гидрологическую оперативную многоцелевую систему (ГОМС), раздел 2.3, осуществляется особая поддержка передаче технологии.

*Программа по оперативной гидрологии — применение и окружающая среда*

- Эта программа сводит воедино гидрологическую и метеорологическую деятельность в поддержку деятельности, направленной на сбережение водных ресурсов, включая гидрологическое моделирование и прогнозирование, а также обеспечение информацией различных проектов, включая проекты по охране окружающей среды. Она вносит вклад в различные метеорологические и климатологические программы ВМО, такие, как Программа по тропическим циклонам и Всемирная климатическая программа.

*Программа по вопросам, связанным с водными проблемами*

- Этот компонент программы вносит вклад в международные программы учреждений в рамках системы ООН (глава 5), а также в программы межправительственных и неправительственных организаций посредством межурожденческой координации и сотрудничества в областях, связанных с водными проблемами, включая совместные региональные проекты по крупным международным речным бассейнам.

Перспективное развитие ПГВР изложено в последовательных долгосрочных планах ВМО [3], которые принимаются Конгрессом ВМО. Регулярная программа ВМО предусматривает четырехлетний бюджет для обеспечения деятельности под эгидой ПГВР.

### 2.1.3        *Осуществление программы*

Программа по оперативной гидрологии (ПОГ) планируется и осуществляется в рамках Комиссии ВМО по гидрологии (КГи). Программа осуществляется в основном через систему рабочих групп и отдельных докладчиков, которые, в соответствии со сферой своей компетенции, занимаются конкретными аспектами оперативной гидрологии, проводя технические совещания и симпозиумы или организуя учебные курсы.

Были разработаны специальные проекты, предназначенные для изучения и сравнения технологий, например: по приборам, прогностическим моделям и

методам проектирования сети. Полученные результаты публикуются в основном в сериях оперативных гидрологических отчетов ВМО. Основные моменты этой деятельности обобщены в настоящем *Руководстве по гидрологической практике*, которое представляет собой руководство к ключевым вопросам, касающимся широкого спектра климатических и земных условий. Согласованная гидрологическая стандартная практика публикуется в томе III (*Гидрология*) *Технического регламента ВМО* [2] (см. также главу 4).

Рабочие группы по гидрологии также учреждаются шестью региональными ассоциациями ВМО для рассмотрения ряда вопросов, входящих в ПГВР, а также других проблем их регионов, связанных с гидрологией, включая:

- a) обследование адекватности сетей гидрологических станций, средств передачи и обработки гидрологических данных, банков данных и гидрологических прогнозов;
- b) применение стандартов и рекомендованной практики ВМО в гидрологии;
- c) развитие и поддержка Гидрологической оперативной многоцелевой системы (ГОМС);
- d) вклады в проекты Всемирной климатической программы — Воды.

Гидрологическая оперативная многоцелевая система (ГОМС) — это система передачи технологии для целей оперативной гидрологии, созданная в 1981 году в рамках Программы по оперативной гидрологии (ПОГ). Ее основное предназначение состоит в оказании содействия гидрологам, главным образом развивающихся стран, при решении их гидрологических проблем путем внедрения современной технологии. Описание ГОМС представлено в разделе 2.3.

В рамках ПГВР были созданы две компьютерные базы данных:

- a) Информационно-справочная служба по гидрологии (ИНФОГИДРО), которая содержит информацию по национальным и региональным гидрологическим организациям, сетям и банкам данных стран-членов ВМО;
- b) Глобальный центр данных по стоку (ГЦДС) при Федеральном институте гидрологии, в Кобленце, Германия, в котором содержится ежесуточная и ежемесячная стоковая информация по определенным станциям более сотни государств.

Эти базы данных регулярно обновляются, публикуется также ключевая информация. Подробные сведения о них приведены в разделе 2.2.

#### 2.1.4 *Развитие трудовых ресурсов*

Подготовка кадров в области гидрологии состоит из ряда различных подходов, таких, как производственное обучение, обучение в учебных заведениях, практические занятия, семинары, а также краткосрочные стажировки экспертов. ВМО предоставляет стипендии для обучения в области оперативной гидрологии и

организует учебные курсы. Организация также готовит и публикует соответствующие руководства и учебные пособия. Значительная часть усилий ВМО в поддержку учебной деятельности предпринимается в сотрудничестве с ЮНЕСКО. Вопрос подготовки кадров в области гидрологии рассматривается в разделе 2.4.

### **2.1.5        *Техническое сотрудничество***

Цель Программы ВМО по техническому сотрудничеству заключается в оказании содействия странам-членам Организации в деле развития их технических возможностей и опоры на собственные силы в тех сферах, где гидрологические и метеорологические службы могут внести существенный вклад в экономическое и социальное развитие. В настоящее время существуют три основных источника финансирования, в то время как гораздо меньший объем средств поступает по каналам деятельности ГОМС:

- a) Программа развития Организации Объединенных Наций (ПРООН);
- b) Программа добровольного сотрудничества (ПДС) ВМО. Отдельные государства обращаются за различного вида помощью, в то время как отдельные доноры готовы оказывать им финансовую поддержку. (ПДС была недавно расширена гидрологией и водными ресурсами);
- c) соглашения о целевых фондах, через которые страны-доноры финансируют конкретные проекты.

Дополнительную финансовую помощь предоставляют Всемирный банк, региональные банки и фонды развития, или экономические объединения, подобные Сообществу развития южноафриканских стран (САДК). Фонды технического сотрудничества, размещенные в рамках регулярного бюджета ВМО, очень ограничены в средствах и почти полностью расходуются на подготовку кадров и стипендии.

Приблизительно 40 процентов от общих ежегодных расходов ВМО на техническую помощь приходится на гидрологию и гидрометеорологию. Секторальные консультативные услуги в области гидрологии по запросу предоставляются полевым бюро ПРООН и странам-членам ВМО.

## **2.2            *Международные базы данных***

### **2.2.1          *Информационно-справочная служба по гидрологии (ИНФОГИДРО)***

Информационно-справочная служба по гидрологии (ИНФОГИДРО) предназначена для распространения информации о:

- a) национальных и международных (правительственных и неправительственных) организациях, учреждениях и агентствах, занимающихся вопросами гидрологии;
- b) структурах, которые входят в организации, упомянутые в пункте (a), и занимаются деятельностью, связанной с гидрологией;

- c) основных международных речных и озерных бассейнах;
- d) сетях станций гидрологических наблюдений стран-членов ВМО — количество станций и продолжительность наблюдений;
- e) национальных банках гидрологических данных — состояние дел по сбору, обработке и хранению данных;
- f) международных банках данных, имеющих отношение к проблемам гидрологии и водных ресурсов.

ИНФОГИДРО, в качестве базы метаданных, не содержит и не обращается к фактическим гидрологическим данным, а также не дублирует национальные справочные системы. Она разработана для облегчения быстрого распространения исходной гидрологической информации и доведения ее до стран-членов ВМО, особенно для их экспертов, агентств и служб, которые занимаются оценкой водных ресурсов, планированием и управлением водными ресурсами и которым необходима поддержка со стороны национальных, региональных или международных организаций, занимающихся оперативной гидрологией. Информация, получаемая из ИНФОГИДРО, дает хорошее представление о деятельности стран-членов ВМО по оценке водных ресурсов.

*Наставление по ИНФОГИДРО* [7] содержит информацию, касающуюся всей базы данных и ее функционирования. Оно также содержит всю гидрологическую информацию, которая имеется в настоящее время в ИНФОГИДРО. Таким образом, *Наставление* в одном томе содержит всестороннюю информацию по гидрологическим службам различных стран мира и их деятельности по сбору данных.

ИНФОГИДРО представляет собой компьютеризированную базу данных, которая может предоставлять данные на дискетах. Информация может быть предоставлена отдельно стране или региону ВМО и может содержать информацию по любому из пунктов от (a) до (f), описанных выше. Запрос на получение этой информации необходимо направлять в ВМО.

### 2.2.2 Глобальный центр данных по стоку (ГЦДС)

1 мая 1987 года при Федеральном институте гидрологии, в городе Кобленц, Германия, под эгидой ООН был учрежден постоянно действующий Глобальный центр данных по стоку (ГЦДС).

ГЦДС действует на благо стран-членов ВМО и международного научного сообщества. Он обеспечивает механизм международного обмена данными о речном стоке и расходах поверхностных вод на непрерывной долгосрочной основе. ГЦДС получает данные из многих источников, главным образом через ВМО. Все данные, хранящиеся в ГЦДС, доступны для потребителей.

По состоянию на ноябрь 1991 г. банк данных ГЦДС содержал данные о стоке для 2 930 станций из 131 страны. Полные ежедневные данные о стоке имелись для 1 478 станций, а отрывочные ежедневные данные — для 186 рядов. Данные о ежемесячном стоке имелись для 1 266 станций.

Основой банка данных являются ежедневные стоковые данные для 1 237 станций из 75 стран, которые первоначально были собраны ВМО в рамках Программы ВМО/MCHC исследований глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) для обоснования моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦ), и позднее в рамках Всемирной климатической программы (ВКП). Начальным годом накопления данных является 1978 год, и почти для всех станций есть данные до 1980 года. Для 40 стран имеются данные до 1982 – 1983 гг., а для Австралии — до 1984 – 1985 гг. Созданная база данных время от времени обновляется.

Станции были отобраны согласно следующим критериям:

- a) равномерное национальное географическое размещение (согласующееся с состоянием сети), с более высокой плотностью в районах с большой изменчивостью стока;
- b) возможно наибольшее широкий охват каждого вида однородных гидрологических районов каждой страны;
- c) относительно небольшие речные бассейны (с площадью водосбора до 5 000 км<sup>2</sup>, а в отдельных случаях до 10 000 км<sup>2</sup>);
- d) данные о стоке представляют естественный речной сток, т. е. они должны быть откорректированы с учетом перебросок стока, водозаборов и регулирования водохранилищами;
- e) хорошее качество данных наблюдений.

ГЦДС разработал пакет программ, обеспечивающий потребителям подбор восстановительных процедур для приведения данных и быстрый доступ к информации. В настоящее время имеются в наличии следующие восстановительные процедуры: таблицы среднесуточного и среднемесячного стока; гидрографы среднесуточного и среднемесячного стока; кривые и таблицы продолжительности стока; информация по станциям и водосбору.

Запросы о данных могут быть сделаны в письменном виде, а также лично посетив ГЦДС в Кобленце. Расходы могут быть оценены покрытием издержек служб обеспечения потребителей (например: стоимостью магнитных лент или дисков, почтовыми и управлеченческими расходами). Расходов можно будет избежать, если частные лица и институты станут вкладчиками данных в ГЦДС.

### **2.2.3        Всемирная информационно-справочная служба климатических данных (ИНФОКЛИМА)**

Всемирная информационно-справочная служба климатических данных (ИНФОКЛИМА) является службой по сбору и распространению информации о существовании и наличии климатических данных в мире. Эта информация содержит, в частности:

- a) описания имеющихся наборов данных, содержащихся в центрах данных и/или опубликованных;
- b) сети климатологических и радиационных станций в мире и их историю;

- c) банки национальных климатологических данных, включая состояние дел по сбору, обработке и архивации данных.

Справочная служба ИНФОКЛИМА создана ВМО в рамках Всемирной климатической программы.

Служба ИНФОКЛИМА получает информацию от стран-членов ВМО, а также от различных центров данных и международных организаций в виде отдельных комплектов данных. ИНФОКЛИМА не обращается к фактическим климатическим данным, а дает информацию о существовании и наличии климатических данных в мире. Она содержится в виде компьютеризированной базы данных.

В каталоге ИНФОКЛИМА содержится описание комплектов данных, которые созданы из отдельных наборов данных или обработаны с помощью определенной программы. Информация о комплектах данных, представленная странами-членами ВМО и международными центрами, редактируется и после проверки, выполненной в центрах данных, в стандартном формате вводится в компьютеризированную базу данных ИНФОКЛИМА. Копии части базы данных на лентах и дискетах в скором времени можно будет получить по требованию.

Для практических целей климатические данные были разделены на ряд категорий, а именно: высотные данные о воздухе, наземные климатологические данные, актинометрические (наземные) данные, данные о морях и океанах, криосферные данные, данные о составе атмосферы, гидрологические данные, исторические и дополнительные данные.

Один экземпляр полного каталога [8] или выдержку о гидрологических данных можно получить бесплатно по запросу в ВМО.

## 2.3 Гидрологическая оперативная многоцелевая система (ГОМС)

В последние десятилетия в гидрологической науке и технике достигнут существенный прогресс, большой вклад был также сделан в освоение и рациональное использование водных ресурсов. Система передачи технологии ГОМС, разработанная ВМО, действует с 1981 года и предполагает простой, но эффективный способ широкого распространения испытанных методов для использования их гидрологами.

### 2.3.1 Структура ГОМС

ГОМС предлагает гидрологическую технологию в виде отдельных компонентов. Эти компоненты могут принимать различную форму, например: наборы чертежей (или пособия с инструкциями) для конструирования гидрологических приборов, отчеты с описаниями разнообразных гидрологических процедур и компьютерные программы, производящие первичный контроль качества гидрологических данных, их обработку и хранение, а также моделирование и анализ обработанных данных. ГОМС имеет около 400 компонентов, которые оперативно используются их создателями, что обеспечивает

**Таблица 2.1**  
**Разделы и подразделы ГОМС**

Раздел А	Политика, планирование и организация
Раздел В	Проектирование сети
Раздел С	Приборы и оборудование
C00	Общие положения
C05	Качество воды, приборы для наблюдения за некоторыми переменными
C06	Температура воды
C09	Речные наносы
C10	Взвешенные наносы
C12	Донные наносы
C14	Влекомые наносы
C16	Химическое качество
C21	Биологическое качество
C25	Общие метеорологические данные; климатические и метеорологические станции
C26	Осадки, общие положения
C27	Осадки, обычные и суммарные осадкомеры
C30	Осадки, автоматические и телеметрические станции
C33	Осадки, измерения при помощи радиолокаторов
C35	Температура воздуха
C37	Температура почвы
C39	Влажность
C41	Солнечное сияние
C43	Солнечная радиация
C45	Испарение, общие положения
C46	Испарение, испарители
C48	Испарение, лизиметры
C52	Скорость и направление ветра
C53	Снег, высота и водный эквивалент
C55	Влажность почвы, общие положения
C56	Влажность почвы, пробоотборники
C58	Влажность почвы, нейтронные методы
C60	Влажность почвы, методы электросопротивления
C62	Влажность почвы, тензиометры
C65	Подземные воды, уровень
C67	Подземные воды, буровое оборудование
C71	Уровень воды
C73	Расход воды, лотки, водосливы, ультразвуковые и электромагнитные методы
C79	Скорость течения воды, вертушки и поплавки
C85	Гидрометрические станции, общие положения
C86	Гидрометрические станции, канатные переправы
C88	Гидрометрические станции, лебедки, гидрометрические мостики и др.

Таблица 2.1 (*продолжение*)

C90	Гидрометрические станции, оборудование используемое при измерениях с лодки
C92	Измерения льда
Раздел D	Дистанционное зондирование
Раздел Е	Методы наблюдений
E00	Общие положения
E05	Качество воды
E09	Наносы
E25	Метеорологические наблюдения для гидрологии
E53	Снег и лед, гляциология
E55	Влажность почвы
E65	Подземные воды
E70	Поверхностные воды, уровень и сток
E71	Уровень воды
E73	Измерения расхода, метод смешения
E79	Измерения скорости, применение вертушек
E85	Измерение гидрологических характеристик по картам
E88	Водные изыскания
Раздел F	Передача данных
Раздел G	Хранение, поиск и распространение данных
G00	Общие положения
G05	Стандарты, наставления и рекомендации
G06	Системы хранения общих гидрологических данных
G08	Системы хранения данных о поверхностных или речных водах
G10	Системы хранения данных о подземных водах: уровни, химический состав, происхождение и расход скважин
G12	Системы хранения метеорологических данных
G14	Системы хранения данных о качестве воды
G20	Программы табличной обработки гидрологических данных общего назначения
G25	Гидрологические ежегодники
G30	Информационные системы и системы распространения данных
G40	Обмен данными между ответственными организациями, стандарты, рекомендации, наставления и методы кодирования
G42	Обмен данными между потребителями, программы осуществления стандартов в G40
Раздел H	Первичная обработка данных
H00	Системы обработки некоторых видов данных
H05	Общие данные о качестве воды
H06	Данные о температуре воды
H09	Данные о переносе наносов
H16	Данные о химическом составе

Таблица 2.1 (*продолжение*)

H21	Данные о биологическом составе
H25	Общие метеорологические данные для применения в гидрологии
H26	Данные об осадках, полученные без помощи радиолокаторов
H33	Радиолокационные данные об осадках, включая тарировку, в сравнении с телеметрическими станциями
H35	Данные о температуре воздуха
H39	Данные о влажности воздуха
H41	Актинометрические данные, продолжительность солнечного сияния и солнечная радиация
H45	Данные об испарении
H52	Данные о ветре
H53	Данные о снеге и льде, снежный покров, высота, водный эквивалент
H55	Данные о влажности почвы
H65	Данные о подземных водах
H70	Поверхностные воды (уровень и сток), общие положения
H71	Данные об уровне воды, уровень воды в реке, озере или водохранилище
H73	Данные о расходах, все диапазоны
H76	Построение кривых уровня—расходы, преобразование уровня в расходы с помощью кривых связи
H79	Данные о скорости течения, вычисление расхода по изменению скорости в точке
H83	Обработка исторической информации о паводках
Раздел I	Вторичная обработка данных
I00	Общие положения
I05	Общие данные о качестве воды
I06	Данные о температуре воды (включая ледовые явления на реках)
I09	Данные о передвижении наносов
I25	Общие метеорологические данные для применения в гидрологии
I26	Данные об осадках
I36	Загрязнения, переносимые по воздуху
I41	Актинометрические данные, продолжительность солнечного сияния и солнечная радиация
I45	Испарение, общие положения
I50	Испарение, вычисление по метеорологическим данным
I53	Данные о снежном покрове
I55	Данные о влажности почвы
I60	Водный баланс
I65	Уровни подземных вод
I71	Данные об уровнях воды
I73	Данные о расходах
I80	Меженный сток
I81	Паводки и их статистический анализ

Таблица 2.1 (*продолжение*)

Раздел J	Модели гидрологического прогнозирования J04 Прогнозы речного стока по гидрометеорологическим данным J10 Расчеты гидографов стока для прогнозирования J15 Объединенные модели прогнозирования речного стока и его трансформации J22 Прогнозирование сезонного стока J28 Прогнозирование меженного стока J32 Прогнозирование влажности почвы J45 Ледовые прогнозы J54 Прогнозирование температуры поверхностных вод J55 Прогнозирование качества поверхностных вод J65 Прогнозирование отложения наносов J80 Анализ точности моделей
Раздел K	Гидрологический анализ для планирования и проектирования гидротехнических объектов и водохозяйственных систем K10 Региональный анализ K15 Изучение паводков на конкретных объектах K22 Модели типа осадки—сток K35 Модели формирования и трансформации речного стока K45 Трансформация через озера и водохранилища K54 Исследование температуры воды K55 Исследование качества воды K65 Исследование наносов K70 Экономическая оценка водохозяйственных проектов и паводки K75 Политика проектирования и эксплуатации водохранилищ
Раздел L	Подземные воды L10 Анализ данных о колодцах и скважинах L20 Модели формирования водоносных горизонтов L22 Калибровка и проверка надежности моделей подземных вод L30 Прогнозирование подземных вод
Раздел X	Математические и статистические расчеты
Раздел Y	Учебные материалы по оперативной гидрологии

реальную пользу и эффективность каждого компонента. На сегодняшний день 35 стран представили компоненты в ГОМС. Каждый компонент имеет двустороннее общее описание, занесенное в стандартном формате, в котором дана информация о содержании и применимости этого компонента, наряду с подробностями автора и имеющейся поддержки. Эти описания содержатся в *Справочном наставлении по ГОМС* (СНГ) [9], образец которого имеется во всех странах, участвующих в ГОМС. *Наставление* на предметной основе поделено на разделы и подразделы (табл. 2.1), а компонентам присвоен код в соответствии с их тематикой и степенью сложности.

В головном разделе *Руководства* приведены перекрестные ссылки на ГОМС. В СНГ содержится полный перечень ссылок на данное *Руководство*.

Составляющие части ГОМС могут быть сгруппированы в последовательности совместимых компонентов, которые можно использовать для выполнения наиболее крупных задач. Эти последовательности также обеспечивают методику оценки одного из компонентов или группы компонентов, необходимых для решения какой-либо частной задачи.

### 2.3.2        *Организация и функционирование ГОМС*

ГОМС организована совместными усилиями стран-членов ВМО, которых в настоящее время (февраль 1994 г.) насчитывается 117. В каждой стране, являющейся членом ВМО, назначается национальный справочный центр ГОМС (НСЦГ), который обычно является составной частью национальной гидрологической службы. Были учреждены региональные координаторы для конкретных регионов.

Функции НСЦГ включают:

- a) предложения по включению в ГОМС тех или иных национальных компонентов и последовательностей;
- b) обработка запросов от других ГОМС по компонентам, которые поддерживаются данной национальной НСЦГ;
- c) получение данных о компонентах из-за рубежа для национальных потребителей;
- d) привлечение внимания потенциальных потребителей в стране к ГОМС и оказание помощи в выборе и применении пригодных компонентов.

Международная деятельность ГОМС направляется и координируется руководящим комитетом, который работает в структуре Комиссии ВМО по гидрологии. Бюро ГОМС в Секретариате ВМО держит национальные справочные центры ГОМС в курсе всех происходящих изменений путем предоставления дополнений к *Справочному наставлению*, содержащих детали новых компонентов, а также путем публикации информационных бюллетеней о деятельности ГОМС.

Гидрологи, желающие использовать компоненты ГОМС, должны взаимодействовать с НСЦГ своих стран, где они будут ознакомлены со *Справочным наставлением по ГОМС* [9]. НСЦГ может также проконсультировать по вопросу выбора компонентов. После решения вопроса о необходимых компонентах, НСЦГ направит официальные запросы в соответствующие подразделения НСЦГ. Когда это необходимо, советники бюро ГОМС сделают запрос и помогут с административными формальностями.

Первоначальной целью ГОМС являлась свободная передача технологии во всех областях гидрологии. Однако некоторые аспекты программного обеспечения созданы на коммерческой основе, и поэтому за них необходимо платить. При передаче технологий в развивающиеся страны необходимая финансовая поддержка

может быть найдена в донорских организациях или в аналогичных организациях, созданных на двусторонней основе. Ряд спонсоров НСЦГ имеют соглашения со своими государственными донорскими организациями по финансированию передачи технологий.

#### 2.4        **Деятельность по подготовке кадров в области гидрологии**

В большинстве гидрологических служб признано наличие трех категорий персонала: профессиональные гидрологи, технические специалисты в области гидрологии и гидрологические наблюдатели. В WMO *Guidelines for the Education and Training of Personnel in Meteorology and Operational Hydrology* [10] (Руководящие указания ВМО по образованию и подготовке кадров в области метеорологии и оперативной гидрологии) эти категории определены следующим образом:

- a) профессиональные гидрологи: это люди с университетским образованием в области гражданских технических или сельскохозяйственных наук, горном деле, геологии и геофизике или им подобным, которые впоследствии специализировались в гидрологии или в смежных с ней областях наук, связанных с водными проблемами. Их деятельность и задачи находятся в диапазоне от управления гидрологическими службами до ведения исследовательской и преподавательской работы, которая может включать гидрологическое обоснование водохозяйственных проектов и анализ гидрологических данных;
- b) технические специалисты в области гидрологии: персонал этой категории можно разделить на две группы:
  - i) люди с 14–12- летним начальным, средним и специальным образованием, имеющие специализацию в одной из гидрологических дисциплин;
  - ii) люди с 10- летним начальным и средним образованием и прошедшие курс обучения по работе с гидрологическими приборами.Персонал первой группы относится к старшим специалистам, а второй — к младшим. В их обязанности входит оказание содействия профессиональным гидрологам и руководство работой гидрологических наблюдателей. Более конкретно, в их функции входит выполнение специальных измерений, сбор и обработка данных, установка гидрологического оборудования и обучение гидрологических наблюдателей;
- c) гидрологические наблюдатели: базовым образованием для этой категории персонала являются, по крайней мере, девять лет начальной и средней школы, а также дополнительное техническое образование в одной из областей гидрологии. Их обязанности заключаются в проведении наблюдений, их регистрации и обслуживании наименее сложных приборов, установленных на их рабочем месте.

ВМО и ЮНЕСКО рекомендуют, чтобы количество персонала зависело от размеров наблюдательной сети. В таблице 2.2, взятой из публикации ЮНЕСКО/ВМО *Water Resource Assessment Activities — Handbook for National Evaluation* [11] (Оценка водных ресурсов: справочник по рассмотрению национальных возможностей),

Таблица 2.2

**Требования по количеству персонала для сбора, обработки и анализа  
данных о поверхностных водах**

Название пункта	Количество персонала на 100 станций				Наблюдатели	
	Профессиональные гидрологи	Техники		Старшие Младшие		
		Старшие	Младшие			
<i>I Гидрологические станции</i>						
Полевые работы и их обеспечение	1	5	5		100	
Обработка, анализ и интерпретация данных	2	3	3		-	
Инспекция	0,5	-	-		-	
Всего	3,5	8	8		100	
<i>II Водобалансовые станции</i>						
Полевые работы и их обеспечение	0,5	2	2		100	
Обработка, анализ и интерпретация данных	1	2	2		-	
Инспекция	0,25	-	-		-	
Всего	1,75	4	4		100	

*Источник:* World Meteorological Organization, 1984: Guidelines for Education and Training of Personnel in Meteorology and Operational Hydrology, WMO-No. 258, Geneva.

- ПРИМЕЧАНИЯ:
1. Многие наблюдатели работают неполный рабочий день или в качестве волонтёров.
  2. Один и тот же полевой персонал часто выполняет функции, заключенные в пунктах I и II.
  3. При проведении полевых работ необходимо учитывать топографические и гидрографические характеристики и наличие персонала. Поэтому приведенные величины необходимо корректировать для каждого конкретного случая.

приводится необходимое количество персонала каждой категории на 100 гидрометрических или водобалансовых станций. При использовании этой таблицы необходимо учитывать то, что большинство наблюдателей могут работать на части ставки или быть волонтерами, таким образом они не занимают полную ставку в гидрологической службе. Однако они нуждаются в профессиональной подготовке, и это учитывается для того, чтобы оценить объем необходимых затрат на их подготовку.

Программы обучения персонала детально рассмотрены в [10]. Гидрологические наблюдатели в основном проходят подготовку на рабочих местах, в то время как технические специалисты, наряду с производственным обучением, должны иметь какое-либо официальное техническое образование. С другой стороны, профессиональные гидрологи должны иметь высшее образование. На начальных курсах высших учебных заведений редко есть специализация в области гидрологии, поэтому этот предмет рассматривается в гражданских технических науках, экологических, географических (особенно в науках о земле), сельскохозяйственных науках и в других предметах. Многие профессиональные гидрологи также заканчивают аспирантуру и получают кандидатскую степень. На таком уровне специализация по гидрологии и водным ресурсам широко распространена.

ЮНЕСКО является спонсором ряда международных курсов для дипломированных специалистов по гидрологии, которые были открыты при университетах и институтах. Подробности об этих курсах можно получить в ЮНЕСКО.

ВМО особенно поддерживает обучение профессиональных гидрологов. Организация также оказывает содействие в подготовке инструкторов для персонала более низкого уровня. Время от времени, когда позволяют средства, организуются краткосрочные курсы для профессиональных гидрологов. Часто эти курсы организуются для конкретных регионов ВМО. Подробности о планируемых курсах передаются в метеорологические и гидрологические службы стран-членов ВМО. Другие краткосрочные курсы организуются непосредственно странами-членами ВМО с приглашением к участию представителей других стран. Все проекты технического сотрудничества ВМО включают компонент обучения и подготовки кадров, а в случае региональных проектов, он может составлять весьма значительную часть деятельности в рамках проекта.

ВМО также обеспечивает обучение ограниченного числа групп на признанных международных курсах, например финансируемых ЮНЕСКО. Заявление на обучение в этих группах следует подавать через постоянных представителей страны-заявителя в ВМО.

**Список литературы**

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1991: *Сборник основных документов*. № 1, ВМО-№ 15, Женева.
2. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Технический регламент*. Том III, Гидрология, ВМО-№ 49, Женева.
3. Всемирная Метеорологическая Организация, 1992: *Третий долгосрочный план ВМО*. Часть II, Том V, Программа ВМО по гидрологии и водным ресурсам 1992–2001 гг., ВМО-№ 765, Женева.
4. Организация Объединенных Наций, 1992: *Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде: Проблемы развития в XXI веке*. 26–31 января 1992 г., Дублин, Ирландия.
5. United Nations, 1977: *Mar del Plata Action Plan*. United Nations Water Conference, Argentina.
6. United Nations, 1989: *Official Records of the General Assembly, Forty-fourth Session, Plenary Meetings, Supplement No. 49 (A/44/49)*, Resolution 44/236, International Decade for Natural Disaster Reduction.
7. World Meteorological Organization, 1987: *Hydrological Information Referral Service — INFOHYDRO Manual*. Operational Hydrology Report No.28, WMO-No. 683, Geneva.
8. World Meteorological Organization, 1989: *INFOCLIMA Catalogue of Climate System Data Sets. Hydrological Data Extract*. WCDP-8, WMO/TD- No. 343, Geneva.
9. World Meteorological Organization, 1988: *Hydrological Operational Multipurpose System (HOMS) Reference Manual*. Second edition, Geneva.
10. World Meteorological Organization, 1984: *Guidelines for Education and Training of Personnel in Meteorology and Operational Hydrology*. Third edition, WMO-No. 258, Geneva.
11. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1988: *Water Resource Assessment Activities —Handbook for National Evaluation*.

## ГЛАВА 3

### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ СЛУЖБЫ

#### 3.1           **Функции гидрологической службы**

Для решения проблем экономического и социального развития и для поддержания качества окружающей среды необходима точная информация о состоянии и изменении поверхностных и подземных водных ресурсов, их количестве и качестве. Применение информации о водных ресурсах весьма многообразно. Почти каждый сектор национальной экономики использует информацию о воде для планирования, развития и в оперативных целях. Вода имеет важное значение для всех стран, и по мере увеличения водопотребления растет и ценность информации о воде. Поскольку затраты на правительственные программы по водным ресурсам должны быть оправданы, очень важно показать эффективность гидрологической информации. Соотношение между выгодой и затратами на ее получение по некоторым данным может достигать 40 : 1 (т. е. ценность информации в 40 раз выше затрат на ее получение)[1]. Но более правдоподобным представляется соотношение между выгодой и затратами в пределах 5–10, так, в исследованиях, выполненных в Канаде и Австралии, оно составляет 9,3 и 6,4 [2, 3]. Независимо от реальных цифровых значений, все, кто сегодня занимается вопросами эксплуатации водных ресурсов, считают, что информация о воде является экономически эффективной и крайне необходимой для эффективного ведения водного хозяйства.

##### 3.1.1       **Использование гидрологической информации**

Основная задача гидрологической службы и подобных ей организаций состоит в обеспечении информацией лиц, принимающих решения, о состоянии и тенденциях изменения национальных водных ресурсов. Такая информация требуется для:

- a) оценки национальных водных ресурсов (их количества, качества, распределения во времени и пространстве), потенциала развития отраслей, связанных с водой, и возможности в обеспечении водой настоящих и будущих потребностей;
- b) планирования, проектирования и осуществления проектов по водным ресурсам;
- c) оценки экологического, экономического и социального воздействия современной и перспективной деятельности по управлению водным хозяйством и ведения грамотной водоресурсной политики и стратегии;

- d) оценки влияния на водные ресурсы других, не связанных непосредственно с водой сфер деятельности, таких, как урбанизация или вырубка леса;
- e) обеспечения безопасности людей и имущества при экстремальных явлениях, например при наводнениях и засухах.

Таким образом, гидрологическая служба обеспечивает необходимую информацию для выполнения оценки водных ресурсов, которая определяется в работах [4, 5] как:

«Определение источников, распространения, доступности и качества водных ресурсов, на которых основана оценка возможностей их использования и управления ими».

По мере того как общество все больше осознает важность таких проблем, как глобальное изменение климата и экологическое воздействие урбанизации, растет понимание значения надежной гидрологической информации, являющейся основополагающей для устойчивого развития и эффективной эксплуатации водных ресурсов. Это означает, что как настоящие, так и будущие поколения будут пользоваться достаточными и пригодными водными запасами для удовлетворения своих социальных, экологических и экономических потребностей. Гидрометрическая деятельность, предназначенная для решения текущих проблем, не всегда может отвечать требованиям перспективы.

### **3.1.2        *Функции и обязанности гидрологической службы***

Информация о водных ресурсах может потребоваться для отдельного конкретного участка, например для обеспечения строительства дамбы, или для целого региона, например для проектирования автострады, пересекающей многочисленные водотоки. В первом случае, информацию можно с небольшими затратами получить в одном створе или на вышележащем водосборе, и она может быть названа информацией специального назначения. Во втором случае, практически невыгодно собирать полную информацию о каждом пересекаемом водотоке. Тогда в нескольких ограниченных районах следует собирать данные общего назначения, презентативные для всего региона, которые затем на основании разработанных методик переносятся на районы, не охваченные наблюдениями. Для этого необходима опорная сеть наблюдательных станций, данные которой можно использовать в самых разнообразных целях. Они являются характерными для гидрологии региона и должны собираться по стандартам, способным удовлетворить разумные потребности любых потенциальных потребителей.

Для удовлетворения этих требований гидрологическая служба должна:

- a) установить потребности существующих и перспективных потребителей информации о водных ресурсах;
- b) определить стандарты (надежность, точность, заблаговременность, доступность и др.) данных, которые определяются этими потребностями;

- c) спроектировать и установить гидрометрическую сеть для измерения различных типов требуемых данных. Нужны как специальные, так и опорные сети, которые могут дополнять или взаимно перекрывать друг друга;
- d) разрабатывать методы передачи информации из пунктов наблюдений в другие регионы, для которых она репрезентативна;
- e) собирать данные и поддерживать качественный контроль за процессом получения информации посредством наблюдения за полевыми установками и полевыми работами;
- f) обрабатывать и систематизировать данные, обеспечивать контроль за качеством и надежностью архивных материалов;
- g) сделать данные доступными для потребителей, учитывая когда, где и в какой форме они требуются, включая:
  - i) распространение гидрологических прогнозов и предупреждений;
  - ii) публикацию ежегодников базовых данных в форме печатных изданий, микрофильмов, а также в машинносчитываемой форме (CD-ROM, диски и др.);
  - iii) подготовку отчетов по водным ресурсам, в которых данные всесторонне анализируются. Они могут включать: гидрологические атласы или базы данных в географических информационных системах; информативный или образовательный материал для использования общественностью, средствами массовой информации и в школах;
  - iv) информацию для проектирования, включая вероятность экстремальных значений стока;
- h) сообщать потенциальным потребителям имеющуюся информацию и содействовать им в наиболее эффективном ее использовании;
- i) разрабатывать новые методы и проводить научные исследования гидрологических и связанных с ними процессов, чтобы помочь потребителям в интерпретации и понимании данных;
- j) способствовать обучению персонала и осуществлять другие функции, связанные с получением качественных данных, такие, как подготовка учебных наставлений, апробирование и оценка новых приборов;
- k) обеспечивать сотрудничество с другими ведомствами для получения информации, связанной с водой и другой необходимой информацией, например: гидрогеологической, топографической и климатической, а также по водопользованию и землепользованию.

Упрощенная схема деятельности гидрологической службы представлена на рисунке 3.1.

Гидрологическая служба может выполнять эти функции на контрактной основе для отдельных заказчиков, например энергетических компаний. С другой стороны, она могла бы обеспечивать чисто общественные нужды, используя средства налогоплательщиков, поскольку ее информация имеет важное значение для широких слоев населения. В любом случае, большое внимание следует уделять системам связи с потребителями как для определения их требований, так и для быстрого и полного обеспечения гидрологической информацией. Управление природными ресурсами ведется все более комплексно, поэтому необходимы

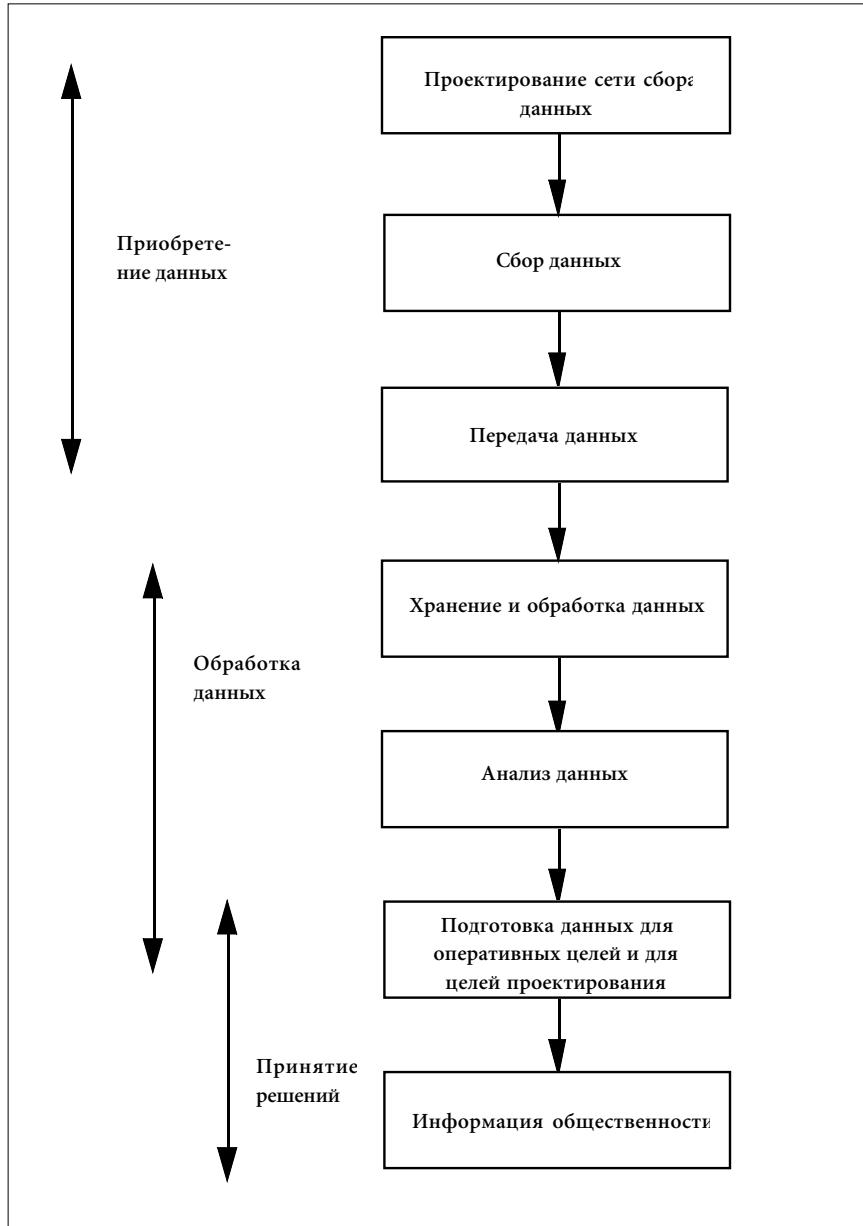


Рисунок 3.1 — Функции гидрологической службы

различные данные: гидрологические, геологические, топографические, о землепользовании, социально-экономические (например потребление воды) и др. Быстрое развитие компьютерной технологии облегчает процесс сбора и обработки данных, а часто и улучшает способность организаций к сотрудничеству и обмену информацией.

### 3.1.3        *Виды данных для потребителей*

Предложено много классификаций гидрологической информации для ее потребителей [6]. Гидрологическими службами трех стран — Австралии, Канады и США — [2, 3, 7] установлено, что области использования только данных о стоке весьма обширны; другие виды гидрологической информации также имеют дополнительное применение. Новый подход к подобной классификации представлен в публикации ЮНЕСКО/ВМО *Water Resource Assessment Activities — Handbook for National Evaluation* [4] (Оценка водных ресурсов: справочник по рассмотрению национальных возможностей), в котором рассмотрены некоторые виды водохозяйственных проектов, требующих гидрологической информации (раздел 50.4). Аналогичная классификация с более условным определением типов используемых данных о воде выполнена Австралийским советом по водным ресурсам [3].

За основные цели оценки водных ресурсов следует принимать главные элементы гидрологической системы, которые можно классифицировать как приток, аккумуляция и отток (рисунок 3.2). Во многих случаях нужны другие данные, такие, как уровень и качество подземных вод, использование воды (водопотребление, возвратные воды от орошения, водопользование, например биологическое потребление кислорода (БПК) сточных вод и т. д.); и негидрологические данные, например: интенсивность использования водных объектов для рекреации, объем выловленной рыбы из водного объекта и др.

Таким образом, гидрологической службе и подобным ей организациям нужно накапливать большой объем различной информации. Степень экономического и социального развития страны, чувствительность природной среды к нарушениям в результате антропогенной деятельности и непосредственно сама природная и физическая среда (климат, рельеф, избыток или недостаток воды и т. д.) — все это определяет уровень необходимой информации. Структурная типизация, предложенная в работе [4], исходит из переориентации деятельности гидрологической службы от экологической направленности в проектно-эксплуатационную и, наконец, в ресурсно-управленческую направленность. На каждом этапе требуется различная информация, в зависимости от количества и типа принимаемых решений. На первом этапе общество, главным образом, приспособливается к окружающей среде и естественному гидрологическому режиму. На втором — использование водных ресурсов нарастает, но они все еще значительно превышают потребности в них. При принятии решения в основном уделяют внимание

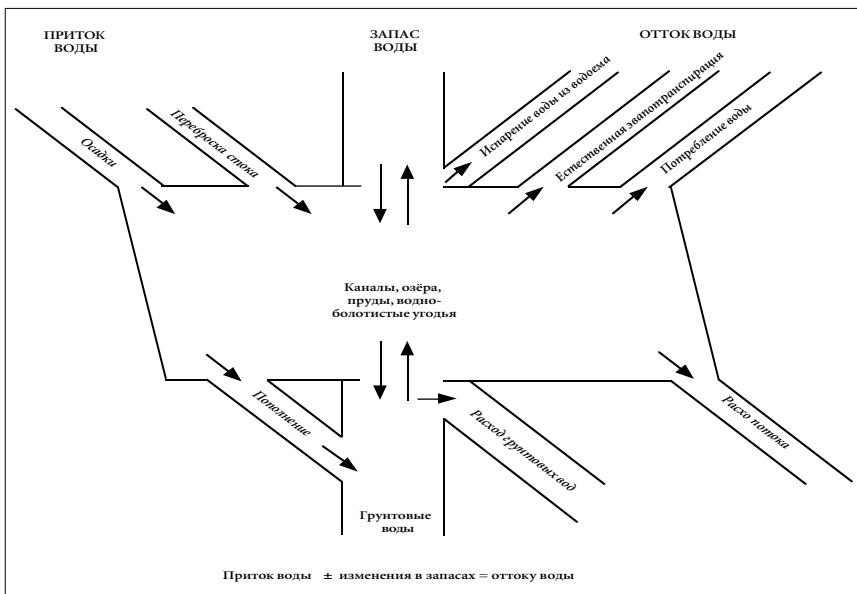


Рисунок 3.2 — Диаграмма, демонстрирующая основные элементы гидрологической системы, необходимые для водного баланса типичного речного бассейна в полувлажном районе

способам эксплуатации ресурсов путем строительства дамб, мелиоративных систем и пр. Основное требование к информации заключается в получении статистических характеристик пространственной и временной изменчивости водных ресурсов. На третьем этапе уже не существует изобилия ресурсов, человеческая деятельность оказывает заметное влияние (обычно негативное) на количество и качество ресурсов; при принятии решения все больше внимания уделяют регулированию потребностей и запасов, чтобы эффективно распределять ценные ресурсы среди конкурирующих потребителей. Следовательно, требуется информация не только о состоянии водных ресурсов, но и о их использовании и его воздействии.

Область возможных альтернативных решений растет с каждым этапом, поэтому увеличивается потребность в различной информации. Следовательно, возрастает роль гидрологической службы и предъявляемые к ней требования. Тем не менее, деятельность большинства гидрологических служб в основном заключается в получении количественной информации о водных ресурсах (общие запасы, многолетняя изменчивость, экстремальные значения). Значение качества воды становится во многих странах все более актуальным для: водопотребления (коммунального, промышленного и сельскохозяйственного), водопользования (искусственное культивирование водных

организмов, рыбные запасы, рекреационное использование) и из-за экологических проблем (эвтрофикация озер, нарушение естественных запасов пресных вод и экосистем эстуариев).

### 3.1.4 *Прогнозирование экстремальных явлений в реальном масштабе времени*

В предыдущих разделах рассмотрена роль гидрологической службы в проведении оценки состояния водных ресурсов, для этого необходимы продолжительные непрерывные наблюдения как с точки зрения будущих потребностей, так и для современного водного хозяйства. Однако во многих странах основной задачей является выпуск прогнозов и предупреждений об экстремальных гидрологических явлениях, главным образом: паводках, засухах, штормовых волнениях и опасностях схода снежных лавин. Многие из этих явлений связаны и с атмосферными процессами, и с водой, поэтому прогнозы обычно даются в сотрудничестве с национальной метеорологической службой. Из-за огромной социальной важности таких экстремальных явлений общепринятым является тесное сотрудничество с министерством гражданской обороны или министерством внутренних дел, которые имеют необходимую инфраструктуру для выпуска предупреждений, эвакуации людей и для оказания помощи при ликвидации последствий.

Хотя на первый взгляд, для выпуска прогнозов и предупреждений необходима такая же информация, как и для оценки водных ресурсов (т. е. интенсивность осадков, уровень воды и т. д.), фактически к ней предъявляются особые требования. При прогнозировании самое большое значение имеет своевременность, доступность и надежность информации, чтобы с уверенностью можно было принять то или иное срочное решение. Менее важна высокая точность, непрерывность данных или соответствие научно-обоснованным методам при отборе проб. Расхождения в требованиях, предъявляемых к данным, используемым для оценки водных ресурсов и для прогнозирования/предупреждения опасных явлений, могут представлять значительные практические трудности в связи с двойной функцией гидрологической службы, и даже могут вызвать необходимость в использовании специальных приборов, систем передачи и распространения информации.

## 3.2 *Организация гидрологической и метеорологической служб*

Способ организации гидрологической службы значительно отличается по странам, в зависимости от таких факторов, как государственная и политическая система, размеры страны, уровень экономического развития, географическое положение и потребность в конкретной информации. Как было показано в разделе 3.1.3, потребности в информации изменяются с течением времени, из чего следует, что самая пригодная в данный момент форма организации информационной службы может также меняться.

Существуют четыре главные модели организации гидрологической службы [6]:

- a) единая гидрологическая и метеорологическая служба, т. е. самостоятельное подразделение при правительстве страны;
- b) самостоятельная гидрологическая служба, наиболее вероятно в виде отдела при центральном правительственном ведомстве, который несет основную ответственность за водные ресурсы;
- c) гидрологической службы как таковой не существует, а ответственность за получение информации по водным ресурсам и за другие аспекты оперативной гидрологии возложена на несколько центральных ведомств;
- d) за разные аспекты оперативной гидрологии отвечают несколько специализированных организаций, которые работают на местах, в речных бассейнах на уровне областной или региональной администрации, возможно под руководством центрального правительственного органа.

В некоторых странах можно наблюдать сочетание этих моделей. Еще недавно существовала тенденция к коммерциализации гидрологических служб и институтов, поскольку правительство склоняло их к рыночным отношениям. В исключительном случае это приводит к приватизации гидрологической службы и институтов, при которой правительство и другие заказчики обеспечиваются необходимым обслуживанием на контрактной основе.

Обычно национальная метеорологическая служба занимается составлением прогнозов погоды и обеспечивает оперативную гидрологию метеорологическими и климатологическими данными, связанными с водными ресурсами. Однако частоты сети по сбору данных, эксплуатируемые метеорологическими службами, сосредоточены в аэропортах и на городских территориях, что обусловлено сильной исторической связью между метеорологией и авиацией, а также местопроживанием наблюдателей. Поэтому гидрологическая служба, независимо от национального, государственного или местного уровня, должна дополнять данные, полученные метеорологической службой, собственными данными. Дополнительные телеметрические посты наблюдений за осадками или станции речного мониторинга обычно размещают в незаселенных истоках рек для обеспечения раннего предупреждения паводков, а дополнительные сети по сбору детальной информации для оценки водных ресурсов — на базовом водосборе.

История развития водных ресурсов во многих странах, где раньше они в основном использовались в целях гидроэнергетики и мелиорации, а наблюдения проводились только с точки зрения контролирования паводков, привела к тому, что гидрология и оценка водных ресурсов являются функциями таких правительственных ведомств, как министерство энергетики или министерство сельского и рыбного хозяйства. Часто несколько ведомств имеют собственные разработанные программы по оценке и эксплуатации водных ресурсов. Многие страны

вследствие этого имеют несколько сетей наблюдений и несколько гидрологических архивов. В таком случае, существует опасность дублирования усилий, несовместимости стандартов исходных данных, несогласованности при обработке и систематизации данных и несостоительности всей имеющейся информации или прямой конкуренции за ресурсы между различными ведомствами.

Почти все страны признают необходимость сотрудничества организаций, отвечающих за водные ресурсы, и многие из них уже установили соглашения на центральном правительственном уровне. Существуют отличные примеры успешного взаимодействия, но для полной эффективности сотрудничества необходимо значительное количество коммуникаций и согласованность в работе. Также имеется много стран, где подобные соглашения неэффективны. Большинство примеров успешного сотрудничества наблюдается в межгосударственных речных бассейнах, где все страны имеют общие интересы в области стандартизации методов получения данных, облегчении средств связи и т. д.

По существу, самым эффективным было бы соглашение о размещении всех видов деятельности, связанных с водными ресурсами, в одной организации. Однако на практике страны, где нет единой гидрологической службы, могут проводить оценку и управлять своими водными ресурсами также эффективно, как и страны с централизованной службой. Хотя на современном этапе существует тенденция к увеличению координации и централизации гидрологических организаций, некоторые страны идут в обратном направлении и передают, по возможности, их функции на местный уровень. Основное требование к гидрологической службе заключается в беспрепятственном доведении информации до потребителей. Для этого могут использоваться различные организационные структуры: или это министерство водных ресурсов, или межкоординационный совет с полномочиями государственного надзора, или непосредственный ежедневный контакт гидрологической службы с потребителями ее информации. В ряде публикаций [6, 8, 9] представлены примеры и руководящие указания по приемлемым видам организационной деятельности гидрологических служб.

### Список литературы

1. World Meteorological Organization, 1990: *Economic and Social Benefits of Meteorological and Hydrological Services*. Proceedings of the Technical Conference, Geneva, 26–30 March 1990, WMO– No. 733, Geneva.
2. Acres Consulting Services, 1977: *Economic evaluation of hydrometric data. Report to the Department of Fisheries and Environment*, Ottawa.
3. Australian Water Resources Council, 1988: *The Importance of Surface Water Resources Data to Australia*. Water Management Series 16, Australian Government Publishing Service, Canberra.

4. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1988: *Water Resource Assessment Activities — Handbook for National Evaluation*.
5. World Meteorological Organization/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1991: Progress in the implementation of the Mar del Plata Action Plan and a strategy for the 1990s. *Report on Water Resources Assessment*.
6. Rodda, J. C. and Flanders, A. F., 1985: *The Organization of Hydrological Services: Facets of Hydrology*. Volume 2, Chapter 14, Wiley, New York.
7. Fontaine, R. A., Moss, M. E., Smith, J. A. and Thomas, W. O., 1984: Cost effectiveness of the stream-gauging program in Maine: a prototype for nationwide implementation. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2244*, Reston, Virginia.
8. Godwin, R. B., Foxworthy, B. L. and Vladimirov, V. A., 1990: Guidelines for water resource assessments of river basins. *Technical Documents in Hydrology*, IHP-III Project 9.2, UNESCO, Paris.
9. World Meteorological Organization, 1977: *Casebook of Examples of Organization and Operation of Hydrological Services*. Operational Hydrology Report No. 9, WMO- No. 461, Geneva.

## ГЛАВА 4

### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ И ПРАВИЛА

#### 4.1           **Единицы измерения и обозначения**

Стандартизация единиц измерения и обозначений весьма желательна, и она может быть достигнута при использовании единиц измерения и обозначений, рекомендованных в таблицах 4.1–4.3 [6, 7], где также приводятся используемые обычно единицы измерения и переводные коэффициенты. Была сделана попытка применять в *Руководстве* только те условные обозначения и единицы измерения, которые приведены в таблицах.

#### 4.2           **Рекомендуемые практика и процедуры**

Единообразие и стандартизация гидрологической практики и процедур в тех случаях, когда это возможно, облегчит сотрудничество стран-членов. Рекомендуемые гидрологическая практика и процедуры изложены в нижеследующих главах *Руководства*. Читателю, однако, следует также обращаться к тому III *Технического регламента* [1], содержащему текст рекомендованной практики и процедур по гидрологии в том виде, как он был утвержден ВМО.

Стандартные и рекомендованные метеорологические практика и процедуры изложены в томе I *Технического регламента* [2]. Подробные указания о приборах и методах наблюдений приведены в части В настоящего *Руководства*, а также в других руководящих материалах ВМО, например в *Руководстве по метеорологическим приборам и методам наблюдений* [3] и в *Руководстве по климатологическим практикам* [4]. Методы сбора и хранения гидрологической информации, описанные в части В настоящего *Руководства*, необходимо применять там, где это возможно.

Для удобства ниже приводятся общие рекомендованные практика и процедуры. Странам-членам ВМО предлагается придерживаться их при организации своих гидрологических служб, а также в их деятельности:

- a) опорная сеть гидрометрических станций должна обеспечивать получение оптимальных данных, на которых основана общая оценка региональных и национальных водных ресурсов. Указания по рекомендуемой минимальной плотности сети содержатся в главе 20 настоящего *Руководства*. Вследствие

Таблица 4.1

## Рекомендуемые обозначения, единицы и переводные коэффициенты

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
1	Ускорение вследствие силы тяжести	<i>g</i>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{ft s}^{-2}$	0,305	ИСО
2	Альбедо	<i>r</i>	Выражается десятичным числом			
3	Площадь (поперечного сечения) (водосбора)	<i>A</i>	$\text{m}^2$ $\text{km}^2$	$\text{ft}^2$ acre ha $\text{mile}^2$	0,0929 0,00405 0,01 2,59	ИСО ИСО
4	Химическое качество		$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	ppm	~ 1	(Для разбавленного раствора)

ПРИМЕЧАНИЕ. Там, где имеются международные обозначения, они используются в случае необходимости и оговариваются как ИСО в последней колонке.

\* Кол. IV = переводной коэффициент (кол. VI) × кол. V.

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
5	Коэффициент Шези [ $v (R_h S)^{-1/2}$ ]	$C$	$m^{1/2} \cdot c^{-1}$	$ft^{1/2} s^{-1}$	0,552	ИСО
6	Пропускная способность	$K$	$m^3 \cdot c^{-1}$	$ft^3 s^{-1}$	0,0283	ИСО
7	Градусо-день	$D$	Градусо-день	Degree day	Формула перевода: $^{\circ}C = 5/9 (^{\circ}F - 32)$	кол. IV – по шкале Цельсия, кол. V – по шкале Фаренгейта
8	Плотность	$p$	$kg \cdot m^{-3}$	$lb ft^{-3}$	16,0185	ИСО
9	Глубина, диаметр толщина	$d$	$m$ $cm$	$ft$ $in$	0,305 2,54	ИСО
10	Расход (речного стока) (колодцев)	$Q$ $Q_{we}$	$m^3 \cdot c^{-1}$ $l \cdot c^{-1}$	$ft^3 s^{-1}$ gal (U.S.) $min^{-1}$	0,0283 0,063	ИСО

Таблица 4.1 (продолжение)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
	(модуль стока— $Q A^{-1}$ , или частичный)	$q$	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$	$ft^3 \ s^{-1} \ mile^{-2}$	0,0109 10,9	ИСО
11	Откачка	$s$	$m$ $cm$	$ft$	0,305 30,5	
12	Динамическая вязкость (абсолютная)	$\eta$	$N \cdot s \cdot m^{-2}$			ИСО, также используется Па, с, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
13	Испарение	$E$	мм	in	25,4	
14	Суммарное испарение	$E_T$	мм	in	25,4	
15	Число Фруда	$Fr$	Безразмерное число			ИСО
16	Напор как высота	$z$	м	ft	0,305	ИСО

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
17	Напор как давление	$h_p$	м	kg (force) cm <sup>-2</sup> lb (force) in <sup>-2</sup>	10,00 0,705	
18	Напор гидростатический (уровень воды) = $z + h_p$	$h$ $h$	см м	ft	30,05 0,305	ИСО
19	Напор полный = $z + h_p + h_v$	$H$	м	ft	0,305	ИСО
20	Напор скоростной = $v^2 / (2g)$	$h_v$	см м	ft	30,5 0,305	
21	Гидравлическая проводимость (водопроницаемость)	$K$	см·с <sup>-1</sup>	m d <sup>-1</sup> ft min <sup>-1</sup>	0,00116 0,508	

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
22	Гидравлическая диффузивность = $T C_s^I$	$D$	$\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$			
23	Гидравлический радиус = $A P_w^I$	$R_h$	м	ft	0,305	ИСО
24	Толщина льда	$d_g$	см	in	2,54	
25	Инфильтрация	$f$	мм	in	25,4	
26	Скорость инфильтрации	$I_f$	$\text{мм} \cdot \text{ч}^{-1}$	$\text{in h}^{-1}$	25,4	
27	Истинная водопроницаемость	$k$	$10^{-8} \cdot \text{см}^2$	Darcy	0,987	
28	Кинематическая вязкость	$\nu$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	$\text{ft}^2 \text{ s}^{-1}$	0,0929	ИСО

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
29	Длина	<i>l</i>	см м км	in ft mile	2,54 0,305 1,609	ИСО
30	Коэффициент Маннинга = $R_h^{2/3} S^{1/2} v^{-1}$	<i>n</i>	$\text{с}\cdot\text{м}^{-1/3}$	$\text{s ft}^{-1/3}$	1,486	ИСО, $l/n = k$ , также может использоваться коэффициент шероховатости
31	Масса	<i>m</i>	кг г	lb oz	0,454 28,35	ИСО
32	Пористость	<i>n</i>	%			При необход. может также использоваться усл. обозн. $\alpha$
33	Осадки	<i>P</i>	мм	in	25,4	

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
34	Интенсивность осадков	$I_p$	$\text{мм}\cdot\text{ч}^{-1}$	$\text{in h}^{-1}$	25,4	
35	Атмосферное давление	$p$	Па	hPa mm Hg in Hg	100,0 133,3 3386,0	См. также: «напор как давление»
36	Солнечная радиация** (кол-во энергии излучения на ед. площади)	$R$	$\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$	ly	$4,187 \times 10^4$	
37	Интенсивность солнечной радиации** (поток на единицу площади)	$I_R$	$\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$\text{ly min}^{-1}$	697,6	

\*\* Общие термины: подробную терминологию и условные обозначения см., например в *Руководстве ВМО по метеорологическим приборам и методам наблюдений* (ВМО – № 8) [3].

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
<i>Пункт</i>	<i>Элемент</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Единицы измерения</i>		<i>Переводной коэффициент*</i>	<i>Примечания</i>
			<i>рекомендуемые</i>	<i>также употребляемые</i>		
38	Радиус влияния	$r_2$	м	ft	0,305	
39	Коэффициент истощения	$C_r$	Выражается десятичным числом			
40	Относительная влажность (влажность)	$U$	%			
41	Число Рейнольдса	$R_e$	Безразмерное число			ИСО
42	Сток	$R$	мм	in	25,4	
43	Концентрация наносов	$c_s$	$\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	ppm	Зависит от плотности	
44	Расход наносов	$Q_s$	$\text{т}\cdot\text{сут}^{-1}$	$\text{ton (U.S.) d}^{-1}$	0,907	
45	Касательное напряжение	$\tau$	Па			ИСО

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
46	Уклон (гидравлический, бассейна)	S	Безразмерное число			ИСО
47	Снежный покров	$A_n$	%			
48	Высота снежного покрова	$d_n$	см	in	2,54	
49	Снеготаяние	M	мм	in	25,4	Обычно выражается суточными значениями
50	Влажность почвы	$U_s$	% объема	% mass	Зависит от плотности	
51	Дефицит влажности почвы	$U'_s$	мм	in	25,4	

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
52	Удельная емкость $= Q_{we} s^{-1}$	$C_s$	$m^2 \cdot c^{-1}$	$ft^2 \ s^{-1}$	0,0929	
53	Удельная проводимость	$K$	$mkCm \cdot cm^{-1}$			при $\theta = 25^\circ C$
54	Удельная водоотдача	$Y_s$	Выражается десятичным числом			
55	Запас	$S$	$m^3$	$ft^3$	0,0283	
56	Коэффициент водоотдачи (грунтовые воды)	$C_s$	Выражается десятичным числом			
57	Продолжительность солнечного сияния	$n/N$	Выражается десятичным числом			Фактические( $n$ )/возможные ( $N$ ) часы
58	Поверхностное натяжение	$\sigma$	$N \cdot m^{-1}$			ИСО

Таблица 4.1 (продолжение)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
59	Температура	$\theta$	°C	°F	Формула перевода °C = 5/9 (°F-32)	ИСО, также используется обозначение $t$
60	Общее кол-во растворенных веществ	$m_d$	мг·л <sup>-1</sup>	ppm	~ 1	(Для разбавленных растворов)
61	Водопропускная способность	$T$	м <sup>2</sup> ·сут <sup>-1</sup>	ft <sup>2</sup> d <sup>-1</sup>	0,0929	
62	Упругость водяного пара	$e$	Па	hPa mm Hg in Hg	100,0 133,3 3386,0	
63	Скорость (воды)	$v$	м·с <sup>-1</sup>	ft s <sup>-1</sup>	0,305	ИСО
64	Объем	$V$	м <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup> acre ft	0,0283 1230,0	ИСО
65	Водный эквивалент снега	$w_n$	мм	in	25,4	

Таблица 4.1 (*продолжение*)

I	II	III	IV	V	VI	VII
Пункт	Элемент	Обозначение	Единицы измерения		Переводной коэффициент*	Примечания
			рекомендуемые	также употребляемые		
66	Число Вебера	$W_e$	Безразмерное число			
67	Смоченный периметр	$P_w$	м	ft	0,305	
68	Ширина (поперечного сечения бассейна)	$b$	м км	ft mile	0,305 1,609	ИСО
69	Скорость ветра	$u$	$\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$	$\text{km h}^{-1}$ $\text{mile h}^{-1}$ $k_n$ (or kt)	0,278 0,447 0,514	
70	Радиоактивность (суммарная радиоактивность)	$A$	Бк (Беккерель)	Ci (Curie)	$3,7 \times 10^{10}$	МАГАТЭ
71	Поток излучения (или поток энергии)	$F$	$\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$	$\text{erg cm}^{-2}$	$10^3$	МАГАТЭ
72	Интенсивность потока излучения (или интенсивность потока энергии)	$I$	$\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$10^3$	МАГАТЭ

**Таблица 4.2  
Различные обозначения**

Пункт	Элемент	Условное обозначение	Примечания
1	Концентрация	<i>c</i>	ИСО
2	Коэффициент (вообще)	<i>C</i>	ИСО
3	Разность	$\Delta$	ИСО, величины выражаются в одинаковых единицах
4	Приток	<i>I</i>	
5	Запаздывание	$\Delta t$	Различные единицы
6	Наносы	<i>L</i>	
7	Число (или разряд)	<i>m</i>	ИСО
8	Отток	<i>O</i>	
9	Пополнение	<i>f</i>	
10	Общее число	<i>N</i>	(см. «инфилтрация» в табл. 4.1)

**Таблица 4.3  
Единицы, используемые в таблице 4.1**

Пункт	Элемент	Условное обозначение	Примечания
1	Сантиметр	<i>см</i>	ИСО
2	Сутки	<i>сут</i>	ИСО
3	Градусы Цельсия	$^{\circ}\text{C}$	ИСО
4	Грамм	<i>г</i>	ИСО
5	Гектар	<i>га</i>	
6	Гектопаскаль	<i>гПа</i>	ИСО
7	Час	<i>ч</i>	ИСО
8	Джоуль	<i>Дж</i>	ИСО
9	Килограмм	<i>кг</i>	ИСО
10	Километр	<i>км</i>	ИСО
11	Узел	<i>узел</i>	
12	Литр	<i>л</i>	ИСО
13	Метр	<i>м</i>	ИСО
14	Микросименс	<i>мкСм</i>	
15	Миллиграмм	<i>мг</i>	ИСО
16	Миллиметр	<i>мм</i>	ИСО
17	Минута	<i>мин</i>	ИСО
18	Ньютон	<i>Н</i>	ИСО
19	Миллионная доля	$\text{млн}^{-1}$	
20	Паскаль	<i>Па</i>	ИСО
21	Процент	<i>%</i>	
22	Секунда	<i>с</i>	ИСО
23	Тонна (метр. тонна)	<i>t</i>	ИСО
24	Год	<i>год</i>	ИСО
25	Беккерель	<i>Бк</i>	МАГАТЭ

тесной связи между метеорологией и гидрологией высокая степень координации работы метеорологической и гидрометрической сетей представляет значительные выгоды;

- b) станции опорной сети должны, как правило, действовать в течение относительно продолжительного периода времени, например не менее 10 лет, с целью получения удовлетворительной информации о средних значениях наблюдаемых параметров и их случайных колебаниях;
- c) в дополнение к станциям опорной сети могут быть организованы гидрологические станции специального назначения, предназначенные для специальных исследований и работающие в течение ограниченного периода времени. Программы таких станций могут включать наблюдения за многими элементами. Необходимым условием обеспечения непрерывности и надежности действия станций является их регулярная и частая инспекция;
- d) во избежание путаницы необходимо, чтобы все станции получили точные названия, были определены их точные географические координаты, а там где это необходимо, и их принадлежность к бассейну главной реки, а также реки, озера или водохранилища, на которых они расположены. Необходимо располагать точными, составленными по последним данным справочниками, содержащими характеристики станций и сведения о всех изменениях, произошедших за время действия станции;
- e) желательно соблюдать единообразие в сроках наблюдений в пределах одного водосборного бассейна, руководствуясь при этом наиболее целесообразными для наблюдаемых элементов интервалами между сроками. При исключительных обстоятельствах, например во время паводков, следует производить учащенные измерения некоторых элементов и немедленно подавать сведения о них;
- f) для международного обмена данными рекомендуется пользоваться следующими единицами измерения времени: календарным годом по новому (т. е григорианскому) календарю, месяцами этого года и средними солнечными сутками от полуночи до полуночи, в соответствии с поясным временем. Тем не менее, в некоторых случаях оказывается предпочтительнее пользоваться другими интервалами времени, более тесно связанными с фазами гидрологического цикла;
- g) для более удобной интерпретации наблюденных явлений желательно определять их статистические характеристики, такие, как средние, максимальные и минимальные значения, стандартные отклонения, кривые или таблицы обеспеченности и т. д. Обеспеченность, определенную по данным за сравнительно короткие периоды времени, необходимо сопоставлять с обеспеченностью, полученной за многолетние периоды (30 лет и более). При таком сопоставлении можно установить характер данного короткого периода по

отношению к средним условиям, господствующим в течение многолетнего периода. Некоторые из полученных данных следует публиковать в гидрологических ежегодниках. Такие статистические характеристики по каждой станции помогут оценить данные, полученные для текущего года. Ежегодник должен содержать полную информацию по всем станциям, а именно: название станции, ее координаты, высоту над уровнем моря, площадь бассейна, наблюдаемые элементы, сроки наблюдений, период наблюдений и т.д. Образцы соответствующих таблиц, на которые необходимо обратить внимание, приведены в главе 25 настоящего Руководства;

- h) в международном обиходе желательно употреблять английский, испанский, русский или французский языки и пользоваться только принятыми в международной практике символами, буквенными обозначениями, сокращениями и единицами измерения;
- i) наблюденные и обработанные гидрологические данные дают хорошее представление о гидрологических условиях рассматриваемого района. Они могут оказать большую помощь при разработке или упорядочении программы выпуска прогнозов для гидрологических целей, если такая программа потребуется. Она должна включать прогнозы уровня воды, речного стока, ледовых условий, паводков и штормовых нагонов воды.

#### 4.3 Точность гидрологических измерений

##### 4.3.1 Основные принципы

Теоретически нельзя определить при помощи измерений истинные значения гидрологических элементов из-за возникающих при измерениях ошибок, которые не могут быть полностью исключены. Неопределенность результатов измерений имеет вероятностный характер, который можно рассматривать в виде доверительной вероятности или интервала, в котором с определенной вероятностью может находиться истинное действительное значение некоторой величины. Ширина доверительного интервала также называется полосой ошибок.

Если измерения независимы друг от друга, то неопределенность результатов измерений можно оценить, рассматривая не менее 20–25 наблюдений и вычисляя результирующее стандартное отклонение, и затем определяя доверительный уровень результатов измерений. Этую процедуру обычно нельзя использовать при гидрометрических измерениях, так как значение измеряемой величины может меняться за время измерения. Например, в полевых условиях трудно осуществить большое количество измерений расхода вертушкой при постоянном уровне воды. Поэтому оценку неопределенности следует проводить путем изучения различных источников ошибок при выполнении измерений.

Другая проблема применения статистики к гидрологическим данным возникает из-за допущения, что наблюдения являются случайно-независимыми переменными с

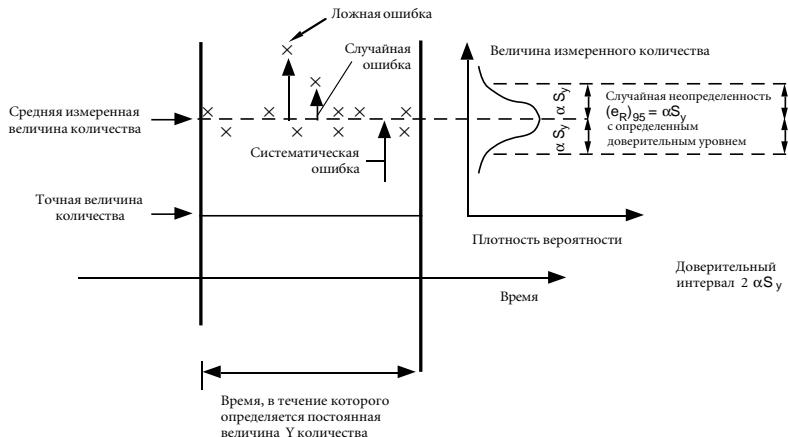


Рисунок 4.1 — Объяснение ошибок

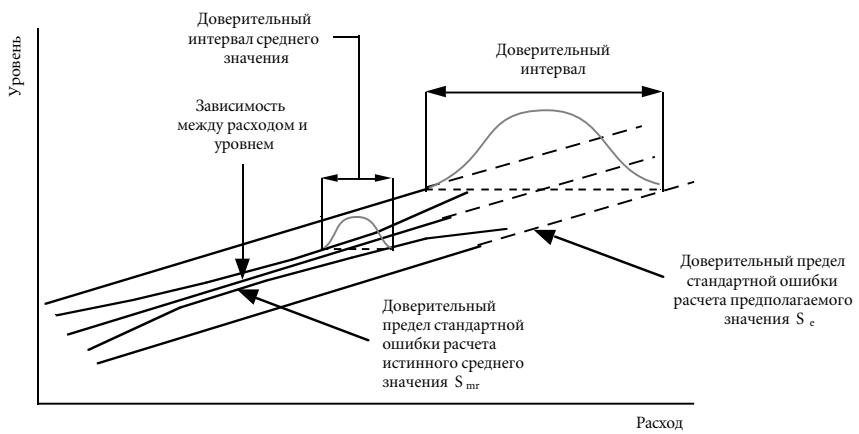


Рисунок 4.2 — Объяснение ошибок в линейной регрессии

определенным статистическим распределением. Это условие редко встречается на практике при гидрологических измерениях. Речной сток по своему характеру не является полностью случайным явлением и зависит от предшествующих значений. Обычно допускается, что некоторое отклонение гидрологических данных от теории ошибок не является столь существенным. Однако следует отметить, что статистический анализ не может заменить точные наблюдения, особенно из-за ложных и систематических ошибок, которые нельзя исключить с его помощью. Статистическими методами можно характеризовать только случайные ошибки.

В этом разделе содержатся определения основных терминов, связанных с точностью гидрологических измерений, а также представлены методы оценки неопределенности и числовые значения требуемой точности для большинства важных гидрологических параметров. В нем также приводятся ссылки на существующие рекомендации, которые содержатся в *Техническом регламенте ВМО [1]* и других публикациях.

#### 4.3.2 *Определения терминов, связанных с точностью измерений*

Приведенные ниже определения терминов, относящихся к точности измерений, сделаны с учетом *Технического регламента ВМО*, том III — Гидрология [1], и *Руководства ВМО по метеорологическим приборам и методам наблюдений* [3]:

**Воспроизведимость.** Степень согласия между результатами измерения одного и того же значения некоторой величины, полученными в разных условиях, т.е. разными приборами, при различном местоположении, и после значительных по величине временных интервалов так, чтобы могли развиться способные приводить к возникновению ошибки различные условия измерения.

**Гистерезис (прибор).** Такое свойство прибора, посредством которого получаются различные результаты измерений при одном и том же фактическом значении, независимо от того, что величина была получена путем или непрерывного увеличения, или непрерывного снижения изменения переменной.

**Диапазон.** Интервал между максимальным и минимальным измеренными значениями величины, для которого прибор был сконструирован, отрегулирован или установлен. (ПРИМЕЧАНИЕ. Он может быть выражен в виде соотношения максимальной и минимальной измеренных величин).

**Доверительная вероятность.** Вероятность нахождения истинной величины в доверительном интервале (рис. 4.1 и 4.2).

**Доверительный интервал.** Интервал, который включает истинную величину с предписанной вероятностью и который оценивается как функция статистических данных выборки (рис. 4.1 и 4.2).

**Допуск.** Допустимое отклонение при измерении определенной переменной.

**Измерения.** Действия, предполагающие определение числа как величины физического количества в определенных величинах. (ПРИМЕЧАНИЕ. Сведения о результате измерения не являются полными, если не приведены (обязательно в терминах статистики) данные о возможной величине неопределенности).

**Истинная величина.** Величина, которая принимается для характеристики количества при условии, которое существует на момент, при котором это количество наблюдается. Это идеальная величина, которая может быть известна только в случаях устранения всех причин ошибок.

**Ложная ошибка.** Величина, наверняка известная как ошибочная, например в результате ошибок человека или неправильной работы прибора (рис. 4.1).

*Неопределенность.* Величина интервала, в котором может с заданной вероятностью находиться действительное значение некоторой величины (рисунок 4.1). (ПРИМЕЧАНИЕ. Числовое значение неопределенности является результатом истинного стандартного отклонения ошибок и числового параметра, зависящего от доверительного уровня):

$$e = \pm \alpha \sigma_y \approx \pm \alpha s_y. \quad (4.1)$$

Стандартное отклонение  $s_y$ , вычисленное для  $n$  наблюдений, приближается к истинному стандартному отклонению  $\sigma_y$ , когда  $n$  стремится к бесконечности. В случае нормального распределения ошибок, числовые параметры равны:

Доверительный уровень	$\alpha$
0,50	0,674
0,60	0,842
0,66	0,954
0,80	1,282
0,90	1,645
0,95	1,960
0,98	2,326
0,99	2,576
0,999	3,291

*Нормальное распределение (Распределение Гаусса).* Математически определенное симметричное, колоколообразное, непрерывное распределение, традиционно принимаемое как представляющее распределение случайных ошибок.

*Ожидаемое значение.* Лучшая аппроксимация истинной величины, которая может быть средним значением нескольких или большого количества измерений.

*Ошибка.* Разность между результатом измерения и действительным значением измеряемой величины. (ПРИМЕЧАНИЕ. Этот термин применяется также для обозначения разности между результатом измерения и наилучшей аппроксимацией для действительного значения (а не собственно действительным значением). Наилучшим приближением может быть среднее значение из результатов нескольких или достаточно многих измерений).

*Повторяемость.* Степень сходства, при наличии случайных ошибок, между результатами измерения одного и того же значения некоторой величины, полученными в одних и тех же условиях, т. е. одним и тем же наблюдателем, использующим один и тот же прибор в том же самом месте, и, кроме того, в пределах достаточно коротких временных интервалов, исключающих возможность появления реальных расхождений.

*Поправка.* Величина, которая должна быть добавлена к результату измерения так, чтобы учесть все известные ошибки, и таким образом максимально приблизиться к действительному значению.

*Предельное допустимое отклонение.* Ограниченнное нижнее или верхнее значение, определенное для количественной характеристики.

*Прецизионность.* Степень сходства результатов измерения одной и той же величины с помощью заданной процедуры измерения в одних и тех же условиях. (ПРИМЕЧАНИЯ: (a) точность означает степень близости с действительным значением, а прецизионность означает только близость между результатами измерения; (b) точностью наблюдения или фиксирования является наименьшая единица деления масштаба измерения, при которой возможно фиксирование или непосредственно, или путем расчета).

*Разрешающая способность.* Наименьшее изменение физической переменной, которое может вызвать изменение в отклике измерительной системы.

*Систематическая ошибка.* Та часть ошибки, которая:

- a) остается постоянной в результате ряда измерений одного и того же значения данной величины; или
- b) изменяется в соответствии с определенным законом при изменении условий (рисунок 4.1).

*Случайная ошибка.* Та часть ошибки, величина и знак которой непредсказуемо изменяются при измерении одного и того же значения заданной величины при одних и тех же условиях (рисунок 4.1).

*Стандартная ошибка расчета ( $S_e$ ).* Мера отклонения или рассеивания наблюдений по линейной регрессии. В цифровом отношении она аналогична стандартному отклонению, за исключением тех случаев, когда отношение линейной регрессии заменяет среднеарифметическое и  $(n-1)$  заменяется  $(n-m)$ :

$$S_e = \left[ \frac{\sum(d)^2}{n - m} \right]^{1/2}, \quad (4.2)$$

где  $d$  — отклонение наблюдения от рассчитанной величины регрессии;  $m$  — число постоянных в уравнении регрессии; и  $(n-m)$  представляет степени свободы в производном уравнении.

*Стандартное отклонение ( $S_y$ ).* Положительный корень квадратный из суммы квадратов отклонений от среднеарифметической, деленной на  $(n-1)$ ; определяется формулой

$$S_y = \left[ \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n - 1} \right]^{1/2}, \quad (4.3)$$

где  $\bar{y}$  — среднеарифметическое ряда  $n$ - независимых измерений переменной  $y$ , а  $(n-1)$  показывает потерю одной степени свободы.

**Точность.** Степень согласия результата измерения с действительной величиной. Предполагается, что учтены все известные поправки.

**Чувствительность.** Связь изменения реакции с соответствующим изменением стимула (вызывающего эту реакцию), или значение стимула, необходимого для произведения реакции, превышающей определенную величину уже существующей реакции, вызванной другими причинами.

**Эталонное измерение.** Измерения, использующие наиболее передовые достижения науки и техники. Результат такого измерения является наилучшим приближением к действительной величине.

#### 4.3.3 *Виды ошибок*

Ложные ошибки должны устраниться путем исключения тех измерений, в которых они присутствуют. Эти ошибки можно определить путем независимой статистической проверки, например такой, как описана в ИСО 5168 [8], и которая определяет критерий отбраковки.

Систематическая ошибка, главным образом, зависит от приборного оснащения и не может быть снижена за счет увеличения количества измерений при неизменных приборах и условиях проведения измерений. Если величина систематической ошибки известна, то ее следует прибавить или вычесть из результата измерения, и тогда в дальнейших расчетах эту ошибку можно считать равной нулю. Систематическую ошибку следует устранять путем исправления, правильной установки приборов или их замены и/или путем изменения условий стока, например длины прямолинейного участка русла в районе измерительного створа. Эти ошибки часто вызываются сложными условиями проведения измерений, такими, как неуставнившийся сток, меандрирование или плохим выбором местоположения измерительной станции.

Случайные ошибки нельзя устранить, но можно уменьшить их влияние путем повторных измерений элементов. Неопределенность среднего арифметического, вычисленная по  $n$ -независимым измерениям, в  $\sqrt{n}$  раз меньше, чем неопределенность одного измерения. Распределение случайных ошибок обычно можно принять за нормальное (Гаусса). В некоторых случаях нормальное распределение следует заменять другими статистическими распределениями.

#### 4.3.4 *Источники ошибок*

Довольно трудно перечислить все возможные источники ошибок, поскольку у любого прибора или метода измерения они свои. Конкретные источники обычно упоминаются в описаниях приборов и инструкциях по эксплуатации, таких, как описания и инструкции в Стандартах ИСО и в WMO *Manual on Stream Gauging* [9] (Наставление ВМО по измерению расхода воды). Некоторые типичные источники ошибок перечислены ниже:

- a) исходная или ошибка установки нуля: возникает в результате неправильного определения исходной точки отсчета прибора, например нуля водомерной рейки, разницы между нулем водомерной рейки и уровнем гребня водослива;
- b) ошибка в отсчете: возникает в результате неточного определения показаний прибором, например: из-за плохой видимости, волнения или ледовых явлений на водомерном посту;
- c) ошибка интерполяции: обусловлена неточной оценкой положения указателя прибора относительно двух смежных меток на приборной шкале, между которыми расположен указатель;
- d) ошибка наблюдения: подобна ошибке в отсчете, только зависит она от субъективности наблюдателя;
- e) гистерезис (см. предшествующее определение);
- f) ошибка нелинейности: такая ошибка, которая возникает в результате отклонения изменения показаний прибора от пропорциональной зависимости с соответствующим изменением значения измеренной величины за пределами установленного диапазона;
- g) ошибка нечувствительности: возникает, когда прибор не может зафиксировать определенное изменение измеряемого элемента;
- h) дивиационная ошибка: зависит от особенностей прибора, когда его измерительные характеристики при определенном использовании меняются с течением времени, например, механические часовые механизмы изменяют показания со временем и зависят от окружающей температуры;
- i) ошибка неустойчивости: возникает, когда в приборе не могут постоянно стабильно поддерживаться определенные специальные метеорологические условия;
- j) ошибка при измерении вне определенного диапазона: возникает при использовании прибора вне его диапазона эффективного измерения, ниже минимального или выше максимального значения, которые определяются конструктивными особенностями или установкой прибора (например неожиданно высокий уровень воды);
- k) ошибка использования прибора за пределами допустимой точности: возникает при неправильном использовании прибора, когда минимальная ошибка больше допустимой при измерении.

#### **4.3.5 Вторичные ошибки измерения**

Гидрологические характеристики часто вычисляются по нескольким измеренным составляющим. Например, расход на измерительных сооружениях вычисляется как функция коэффициента расхода, характеристик размеров и напора. Для оценки суммарной неопределенности можно использовать переходную ошибку теории Гаусса.

Суммарная неопределенность часто называется полной неопределенностью, которая может определяться по неопределенности отдельных составляющих, если ошибки определения этих составляющих статистически независимы.

Если количество  $Q$  является функцией нескольких измеренных количеств  $x, y$  и  $z$ , то ошибку  $e_Q$  в  $Q$ , вследствие ошибок  $e_x, e_y$  и  $e_z$  в  $x, y$  и  $z$ , соответственно следует вычислять с помощью следующего упрощенного уравнения:

$$(e_Q)^2 = \left( \frac{\partial Q}{\partial x} e_x \right)^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial y} e_y \right)^2 + \left( \frac{\partial Q}{\partial z} e_z \right)^2, \quad (4.4)$$

где  $\partial Q / \partial x, \partial Q / \partial y$  и  $\partial Q / \partial z$  являются функциями частных производных, которые точно отражают связь зависимой переменной с независимыми.

При гидрологических измерениях практически невозможно проведение повторных полевых наблюдений в одинаковых условиях. Поэтому стандартное отклонение нужно определять по данным измерений переменных величин (как, например, в случае кривой зависимости расхода от уровня).

Стандартная ошибка расчета

$$s_e = \left( \frac{\sum d^2}{n - 2} \right)^{1/2} \quad (4.5)$$

средних наблюдений исключительно важна для того, чтобы охарактеризовать связь между расходом и уровнем, которая имеет нелинейный вид и приближается к логарифмическому виду и требует поэтому специальной обработки. Стандартная ошибка является оценкой точности средней рассчитанной по регрессионной зависимости связи, и следовательно она представляет собой интервал, в котором с наибольшей вероятностью следует ожидать нахождения истинного среднего значения (рисунок 4.2)

$$s_{mr} = \frac{s_e}{\sqrt{n}}. \quad (4.6)$$

Более характерно относительное стандартное отклонение для нелинейной зависимости между двумя переменными, которое может быть рассчитано как

$$s_y \% = \left[ \sum \left( \frac{y_m - y_c}{\frac{y_c}{n - 1}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (4.7)$$

где  $y_m$  — измеренное значение, а  $y_c$  — значение, рассчитанное по регрессионному уравнению (или снятое с графика).

#### 4.3.6 Характеристика приборов и методов наблюдений

Точность измерительного прибора может характеризоваться неопределенностью при определенном значении, которая соответствует максимальному или

минимальному значению измеренной величины. Точность прибора, независимо от значения, нередко может неправильно пониматься и истолковываться. Инструментальная точность в большинстве случаев представляет собой только один из компонентов общей точности измерения.

Для характеристики неопределенности, обычно применяют 95-процентный доверительный уровень; т. е. в 5 процентах случаев ошибка может выйти за пределы определенного доверительного интервала. В соответствии с *Техническим регламентом ВМО [1]*, измерение расхода должно записываться в одной из следующих форм:

- a) неопределенности, выраженные в абсолютных выражениях:

измеренное значение гидрологических элементов

например расход

$$Q = \dots$$

случайная неопределенность

$$(e_r)_{95} = \dots$$

- b) неопределенность, выраженная в процентных единицах:

измеренное значение гидрологических элементов

$$Q = \dots$$

случайная процентная неопределенность

$$(e_r)_{95 \%} = \dots \%$$

На практике неопределенности измерений представляются в виде, когда неопределенность выражается соотношением (или в процентах) измеренных значений  $Q_m$ . Например, когда  $(e_r)_{95} = 10 \%$ , истинное значение  $Q_{95 \%}$  будет лежать в пределах  $Q_m \pm 0,10 Q_m$ . В этом примере неопределенность выражена при средних принятых условиях измерения.

#### **4.3.7 Рекомендуемая точность гидрологических измерений**

Рекомендуемая точность в основном зависит от предполагаемого использования измеренных данных (цели измерения), от возможностей и наличия приборов и финансовых средств. Поэтому она не может быть постоянной величиной и должна скорее находиться в гибких пределах. Уровни рекомендуемой точности сведены в таблицу 4.4, которая может служить основным руководством по приборам и методам наблюдений. Во многих странах национальные стандарты приспособливают к требуемой точности.

#### **4.4 Гидрологические коды**

##### **4.4.1 Общие положения**

Во всех системах передачи данных применяются различные виды кодирования данных, которые повышают быстроту и надежность передачи. В полностью автоматизированных

Таблица 4.4

**Рекомендуемая точность измерений (уровни неопределенности) при  
95-процентном доверительном уровне**

Осадки (количество и вид)	3–7 %
Интенсивность дождя	1 $\text{мм}\cdot\text{ч}^{-1}$
Толщина снега (в точке)	1 см при толщине менее 20 см или 10 %, если более 20 см
Содержание воды в снеге	2,5–10 %
Испарение (в точке)	2–5 %, 0,5 мм
Скорость ветра	0,5 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$
Уровень воды	10–20 мм
Высота волны	10 %
Глубина воды	0,1 м, 2 %
Ширина водной поверхности	0,5 %
Скорость течения	2–5 %
Расход	5 %
Концентрация взвешенных частиц	10 %
Перенос взвешенных наносов	10 %
Перенос донных наносов	25 %
Температура воды	0,1–0,5 °C
Растворенный кислород (при температуре воды более 10 °C)	3 %
Мутность	5–10 %
Цвет	5 %
pH	0,05–0,1 pH единиц
Электропроводимость	5 %
Толщина льда	1–2 см, 5 %
Ледяной покров	5 % при $\geq 20 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$
Влажность почвы	$1 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3} \geq 20 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$

**ПРИМЕЧАНИЕ.** Когда рекомендуется предел точности для уровней, более высокая точность связана с измерениями в относительно хороших условиях, а более низкая — в неблагоприятных условиях.

системах информации обязательно переводится в кодированный вид, прежде чем она обрабатывается. Поэтому коды разрабатываются по определенным формам, приспособленным для передачи информации и совместимым с процессом обработки данных, которой обычно предшествует контроль качества (раздел 22.1).

Структура международных кодов разрабатывалась по общему соглашению и коллективными усилиями. В течение долгого времени в ВМО создавались коды, отвечающие требованиям обмена метеорологическими данными.

Поскольку в оперативной гидрологии обмен информацией осуществляется не в глобальном масштабе, то применяется множество различных кодов. Такое положение привело к тому, что Комиссия ВМО по гидрологии разработала международные гидрологические коды. Они предназначены для удовлетворения наиболее общих требований. По возможности, осуществляется стандартизация методов кодирования и сбора гидрологических данных.

Коды ВМО по гидрологии имеют два вида: HYDRA и HYFOR. Данные, передаваемые по этим стандартным кодовым формам, находятся в соответствии со стандартами ВМО. Следовательно эти данные могут поступать, в случае необходимости, по каналам связи Всемирной службы погоды (ВСП).

Эти коды особенно полезны при сборе и обработке данных по крупным национальным и международным речным бассейнам, когда в центре обработки данных собираются сведения по большому числу станций. Наблюдения обычно кодируются вручную наблюдателем и передаются для сбора в центр обработки.

Совсем недавно для эффективного компьютерного обмена метеорологической информацией были разработаны следующие коды: Двоичная универсальная форма представления метеорологических данных BUFR и GRID — обработанные данные в виде значений в точках сетки.

#### 4.4.2 Типы кодов

Коды HYDRA и HYFOR описаны в первом томе *Наставления по кодам* [5]. Для использования этих кодов, краткое описание которых приводится ниже, следует обратиться к этому *Наставлению*. Код FM 67-VI HYDRA — Сообщение о гидрологическом наблюдении со станции — может использоваться для передачи:

- a) гидрологических данных, связанных с измерением уровня воды;
- b) гидрологических данных, связанных с расходом воды;
- c) данных, связанных с осадками и снежным покровом;
- d) данных, относящихся к температуре воздуха и воды;
- e) данных о состоянии льда на реках, озерах и водохранилищах.

Код FM 68-VI HYFOR — Гидрологический прогноз — может применяться для передачи прогнозов уровня, расхода воды и ледовых явлений.

#### 4.4.3 Идентификация гидрологических наблюдательных станций

В системе передачи данных каждая станция имеет свой идентификационный номер. Основой международной системы идентификации гидрологических наблюдательных

станций служат идентификационные номера. ВМО подготовлены списки международных идентификаторов речных бассейнов по отдельным регионам ВМО и идентификаторов стран для каждого бассейна, в котором располагается гидрологическая станция. Эти списки приводятся во втором томе *Наставления по кодам* [5].

#### 4.4.4 Коды BUFR и GRIB

Код FM 94-IX Ext. BUFR был разработан для архивации и обмена метеорологической информацией. Он предназначен для использования компьютеров и по концепции схож с методами сжатия информации, которые используются в ряде банков гидрологических данных и рассмотрены в главе 24. В настоящее время рассматриваются возможности расширения кода BUFR для его использования при обмене гидрологической информацией через систему связи Всемирной службы погоды (ВСП). При больших объемах информации код BUFR может иметь преимущество перед кодом HYDRA.

Код FM 47-IX Ext. GRID предназначен для передачи обработанных данных в цифровой форме в виде значений в точках сетки, например данных анализа и прогноза метеорологических полей и других геофизических параметров. Сокращенный код GRAF также используется для передачи данных в виде значений в точках сетки. Код FM 92-IX Ext. GRIB — другая версия кода GRID, которая содержит такие же данные в двоичной форме. Все эти коды ориентированы на использование компьютера, но могут расшифровываться и вручную. По мере нарастания использования в оперативной гидрологии данных дистанционного зондирования и пространственной или распределенной информации, включая данные, получаемые с помощью географических информационных систем, ожидается более широкое применение этих кодов и их адаптация к гидрологическим параметрам.

### Список литературы

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Технический регламент*. Том III, Гидрология, ВМО-№ 49, Женева.
2. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Технический регламент*. Том I, Общие метеорологические стандарты и рекомендованные практики, ВМО-№ 49, Женева.
3. Всемирная Метеорологическая Организация, 1990: *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений*. Пятое издание, ВМО-№ 8, Женева.
4. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Руководство по климатологическим практикам*. Второе издание, ВМО-№ 100, Женева.

5. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Наставление по кодам*. Тома I и II, ВМО-№ 306, Женева.
6. International Organization for Standardization, 1979: *Units of Measurement*, ISO Standards Handbook 2, Geneva.
7. World Meteorological Organization, 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu). WMO-No.188, Geneva.
8. International Organization for Standardization, 1978: *Measurement of Fluid Flow: Estimation of Uncertainty of a Flow-rate Measurement*. ISO-5168-1978, Geneva.
9. World Meteorological Organization, 1980: *Manual on Stream Gauging*. Volumes I and II, Operational Hydrology Report No. 13, WMO-No. 519, Geneva.

## ГЛАВА 5

### **МЕЖДУНАРОДНЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ЗАНИМАЮЩИЕСЯ ПРОБЛЕМАМИ ГИДРОЛОГИИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**

#### **5.1               Общие положения**

В данной главе дан обзор участия международных организаций (правительственных и неправительственных), деятельность которых связана с водными ресурсами, а также обзор различных соглашений по комплексному и отраслевому сотрудничеству и взаимодействию на региональном и глобальном уровнях. Он был подготовлен на основе информации, полученной от Межсекретариатской группы по водным ресурсам (МСГВР) Административного комитета ООН по координации (АКК/ООН) [3, 2], см. также раздел 5.4.

#### **5.2               Межправительственные организации (МПО)**

Эти организации созданы на основе соглашений между двумя или более государствами. Они могут иметь глобальный или региональный характер. Деятельность ряда этих организаций определенным образом связана с проблемами водных ресурсов. В таблице 5.1 перечислены организации и специализированные учреждения ООН, действующие на глобальном уровне, а в таблице 5.2 представлена информация о региональных организациях ООН и других ведомствах. Обе таблицы содержат наименования, сокращения и адреса организаций.

#### **5.3               Характер деятельности и взаимодействие организаций системы ООН в вопросах освоения водных ресурсов**

Характер и масштаб деятельности организаций системы ООН в области водных ресурсов имеет очень широкий диапазон. За последние три десятилетия участие этих организаций в решении водных проблем возросло в связи с усилением значимости и сложности рассматриваемых вопросов. В таблице 5.3 представлен общий обзор участия организаций ООН с указанием их главной и прикладной сферы интересов. Объединение по группам было сделано в соответствии с их деятельностью в рамках основных проблем, обсуждаемых на Международной конференции ООН по водным ресурсам и окружающей среде [1], а именно:

- a) оценка водных ресурсов и воздействие изменения климата на водные ресурсы;

Таблица 5.1

**Межправительственные организации, занимающиеся проблемами гидрологии и водных ресурсов на глобальном уровне\***

Название	Сокращение	Адрес
ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ Департамент экономического и социального развития	ДЭСР	United Nations Headquarters, New York, N.Y. 10017, USA
Детский фонд ООН	ЮНИСЕФ	Three United Nations Plaza, New York, NY 10017, USA
Программа развития ООН	ПРООН	One United Nations Plaza, New York, NY 10017, USA
Программа ООН по окружающей среде	ЮНЕП	P.O. Box 30552, Nairobi, Kenya
Университет Организации Объединенных Наций	УООН	Toho Seimei Building, 15-1 Shibuya, 2-Chome, Shibuya-ku, Tokyo 150, Japan
Мировая продовольственная программа	МПП	Via Cristoforo Colombo 426, 00145 Rome, Italy
Центр ООН по человеческим поселениям	Хабитат	United Nations Office in Nairobi P.O. Box 30030, Nairobi, Kenya
Департамент по гуманитарным вопросам Бюро координатора ООН по оказанию помощи в случае стихийных бедствий	ДГВ-ЮНДРО	Palais des Nations, CH-1211 Geneva 10, Switzerland
Всемирный продовольственный совет	ВСП	Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy
Международный учебный и научно-исследовательский институт по улучшению положения женщин	МУНИУЖ	P.O. Box 21747, Santo Domingo, Dominican Republic

\* По состоянию на 1992 г.

Таблица 5.1 (*продолжение*)

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ УЧРЕЖДЕНИЯ И ДРУГИЕ ОРГАНИЗАЦИИ		
Международная организация труда	МОТ	4, route des Morillons, CH-1211 Geneva 22, Switzerland
Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН	ФАО	Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy
Организация ООН по вопросам образования, науки и культуры	ЮНЕСКО	7, place de Fontenoy, 75700 Paris, France
Всемирная организация здравоохранения	ВОЗ	20, avenue Appia, CH-1211 Geneva 27, Switzerland
Международный банк реконструкции и развития (Всемирный банк)	МБРР	1818 H Street, N.W., Washington, D.C. 20433, U.S.A.
Всемирная Метеорологическая Организация	ВМО	P.O. Box 2300, CH-1211 Geneva 2, Switzerland
Международный фонд сельскохозяйственного развития	ИФАД	Via del Serafico 107, 00142 Rome, Italy
Организация Объединенных Наций по промыш- ленному развитию	ЮНИДО	P.O. Box 300, Vienna International Centre, A-1400, Vienna, Austria
Международное агентство по атомной энергии	МАГАТЭ	P.O. Box 100, Vienna International Centre, A-1400 Vienna, Austria

Таблица 5.2

**Межправительственные организации, занимающиеся проблемами гидрологии и водных ресурсов на региональном уровне\***

<i>Название</i>	<i>Сокращение</i>	<i>Адрес</i>
ОРГАНЫ ОРГАНИЗАЦИИ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ Экономическая комиссия для Африки	ЭКА	P.O. Box 3001, Addis Ababa, Ethiopia
Европейская экономическая комиссия	ЕЭК	Palais des Nations, CH-1211 Geneva 10, Switzerland
Экономическая комиссия для Латинской Америки и Карибского бассейна	ЕКЛАК	Casilla 179-D, Santiago, Chile
Экономическая и социальная комиссия ООН для Азии и Тихого океана	ЭСКАТО	The United Nations Building, Rajadamnern Ave., Bangkok 10200, Thailand
Экономическая и социальная комиссия для Западной Азии	ЭСКЗА	P.O. Box 927 115, Amman, Jordan
Бюро ООН для Сахельской зоны (ПРООН)	ЮНСО	One United Nations Plaza, Room DC-1100, New York, NY 10017, U.S.A.
Региональная комиссия по землепользованию и водопотреблению на Ближнем и Среднем Востоке (ФАО)	РHEА-ЛВУ	Via delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy
<b>ДРУГИЕ СТРУКТУРЫ</b>		
Арабский центр по изучению аридных зон и сухих земель	АКСАД	P.O. Box 2440, Damascus, Syria
Карибская метеорологическая организация	КМО	P.O. Box 461, Port of Spain, Trinidad
Постоянный межправительственный комитет по борьбе с засухой в Сахели	СИЛСС	BP 7049, Ouagadougou, Burkina Faso

\* По состоянию на 1992 г.

Таблица 5.2 (*продолжение*)

Региональный комитет по водным ресурсам Центральноамериканского перешейка	PKВРЦАП	c/o ICE, P.O. Box 10032, San JosO, Costa Rica**
Комиссия европейских сообществ	KEC	200 rue de la Loi, Brussels 1040, Belgium
Европейский совет	EC	Avenue de l'Europe, 67 Strasbourg, France
Экономическое сообщество стран Великих озер	СЕПГЛ	BP 58, Gisenyi, Rwanda
Европейское космическое агентство	EKA	8-10 rue Mario Nikis, 75738 Paris, CEDEX 15, France
Межафриканский комитет по гидрологическим исследованиям	МКГИ	B.P. 369, Ouagadougou 01, Burkina Faso
Совет скандинавских стран	CCC	Gamla Rigsdagshuset, Stockholm, Sweden
Организация африканского единства	OAЕ	P.O. Box 3243, Addis Ababa, Ethiopia
Организация американских государств	OAГ	Pan American Union Building, Washington, D.C. 20006, U.S.A.
Организация экономического сотрудничества и развития	ОЭСР	Chateau de la Muette, 2 rue Andre Pascal, 75775, Paris, France

\*\* Ротационный секретариат.

Таблица 5.3

**Организации системы ООН, занимающиеся вопросами освоения водных ресурсов:  
указаны основные и прикладные сферы интересов \***

<i>Сфера интересов</i>	<i>Организации с указанной сферой интересов</i>	<i>Организации с прикладными интересами в указанной сфере</i>
1. Оценка водных ресурсов и влияние изменения климата на водные ресурсы	ВМО, ЮНЕСКО, ДЭСР, ФАО, МБРР, МАГАТЭ	ВОЗ, ПРООН, ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЭСКЗА, ЮНДРО
2. Охрана водных ресурсов, качества воды и водных экосистем	ВОЗ, ВМО, ЮНЕП, ДЭСР, ЕЭК	ВСЕ ОСТАЛЬНЫЕ
3. Вода и устойчивое развитие городского хозяйства, а также питьевое водоснабжение и канализация в контексте городов	ВОЗ, ПРООН, ЮНИСЕФ, МУНИУЖ МБРР, Хабитат	ДЭСР, ЭКА, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЮНЕП, ЭСКЗА
4. Вода для устойчивого производства продовольствия и сельского развития, а также снабжение питьевой водой и санитария в сельских условиях	ФАО, МБРР, ПРООН, МПП, ВОЗ,, ЮНИСЕФ, ДЭСР, Хабитат, МУНИУЖ, МОТ	ЭКА, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЭСКЗА
5. Комплексное освоение и рациональное использование водных ресурсов	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, МУНИУЖ, ПРООН, МБРР	ЮНДРО, ЮНЕСКО, ВМО, ВОЗ, ФАО

\* По состоянию на 1992 г.

- b) охрана водных ресурсов, качества воды и водных экосистем;
- c) водные ресурсы и устойчивое городское развитие, а также снабжение питьевой водой и санитария в городских условиях;
- d) водные ресурсы для устойчивого производства продовольствия и сельского развития, а также снабжение питьевой водой и санитария в сельских условиях;
- e) комплексное освоение и рациональное использование водных ресурсов.

Эти проблемы огромной важности нашли свое отражение в Повестке дня на XXI век, глава 18, Конференции ООН по окружающей среде и развитию (КООНОСР) [4]. Еще одна важная проблема, обсуждавшаяся на Конференции, посвященная механизмам осуществления и координации на глобальном, национальном и локальном уровнях, по своему характеру и масштабам относится к компетенции организаций системы ООН, а также к способам сотрудничества в этих видах деятельности. Вопросы, связанные с созданием потенциала, неизбежно пронизывают все блоки проблем, упомянутых выше.

В таблице 5.4 дан более детальный обзор деятельности этих организаций. Каждый элемент в списке показывает, какие организации принимают участие в деятельности по эксплуатации водных ресурсов, относящейся к конкретным секторам водного хозяйства. Их исследовательские и хозяйствственные функции классифицированы следующим образом:

- a) гидрология поверхностных вод;
- b) гидрология грунтовых вод;
- c) мониторинг качества поверхностных вод;
- d) мониторинг качества подземных вод;
- e) информация о водопотреблении;
- f) освоение (развитие) поверхностных вод;
- g) освоение (развитие) подземных вод
- h) повторное использование сточных вод;
- i) комплексная эксплуатация водных ресурсов;
- j) управление водопользованием;
- k) управление отведением и очисткой сточных вод;
- l) укрепление институтов;
- m) законодательная деятельность;
- n) образование и подготовка кадров;
- o) развитие трудовых ресурсов.

К секторам водного хозяйства относятся следующие:

- a) сельскохозяйственное водопотребление;
- b) питьевое водоснабжение;
- c) промышленное водопотребление;
- d) гидроэнергетика;
- e) судоходство;

Таблица 5.4  
Организации системы ООН, занимающиеся проблемами гидрологии и водных ресурсов \*

Функции по изучению и управлению		Специальные сектора						
		Сельскохозяйственное водопотребление	Питьевое водоснабжение	Промышленное водопотребление	Гидроэнергетика	Судоходство	Контроль за наводнениями	Борьба с засухой
1	Гидрология поверхностных вод	ДЭСР, ЭКА, ФАО, МБРР	ДЭСР, ЮНИСЕФ, ЭКА, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКЗА, МУНИУЖ, МБРР, Хабитат	ДЭСР, ЭКА, МБРР, Хабитат	ДЭСР, ЭКА, МУНИУЖ, ЮНЕСКО, МБРР	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКЗА, ЮНЕСКО, ФАО,	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКЗА, ЮНЕСКО, ФАО, ВМО, МБРР, Хабитат	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКЗА, ЮНЕСКО, ФАО, ВМО, МБРР, Хабитат
2	Гидрология грунтовых вод	ДЭСР, ЭКА, ФАО, МБРР	ДЭСР, ЭКА, МБРР, МУНИУЖ, МБРР, Хабитат	ЭКА, МБРР, Хабитат	Хабитат	ЭКА, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ЮНЕСКО, ФАО, ВМО, МБРР	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКЗА, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО, МБРР

\* По состоянию на 1992 г.

Таблица 5.4 (*продолжение*)

3	Мониторинг качества поверхностных вод	ДЭСР, ЭКА, ФАО, ВОЗ, МБРР	ДЭСР, ЮНИСЕФ, ЭКА, ЭСКАТО, ЮНЕП,	ДЭСР, ВОЗ, МБРР, Хабитат	ЭКА Хабитат	ЭКА, ЮНЕСКО, ФАО, ВМО	ДЭСР, ЭКА, ЮНЕСКО, ФАО, ВОЗ, ВМО, Хабитат
4	Мониторинг качества подземных вод	ЭКА, ФАО, ВОЗ, МБРР	ЮНИСЕФ, ЭКА, ЭСКАТО, ЮНЕП,	ВОЗ, МБРР, Хабитат		ЭКА, ЮНЕСКО, ФАО, ВМО	ЭКА, ЭСКАТО, ЮНЕП, ЮНЕСКО, ВОЗ, ВМО, Хабитат
5	Информация о водопотреб- лении	ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, муниуж, ФАО, МБРР	ЮНИСЕФ, ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЭСКАТО, МБРР, Хабитат	ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, МБРР	ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЮНЕСКО, ВМО	ЭКА, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЮНЕСКО, ВМО	ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЮНЕСКО, ФАО, МБРР

Таблица 5.4 (*продолжение*)

6	Освоение поверхностных вод	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ФАО, МПП, МБРР	ДЭСР, ЮНИСЕФ, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКАТО, Хабитат	ДЭСР, ЭКА, МБРР	ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКАТО, Хабитат	ДЭСР, ЭКА, ЭСКЗА	ДЭСР, ЭКА, ФАО, МПП, МБРР, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКЗА, ФАО, МПП, МБРР, Хабитат
7	Освоение подземных вод	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ФАО, МПП, МБРР	ДЭСР, ЮНИСЕФ, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКАТО, Хабитат				ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ЮНЕСКО, ВМО	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, ЭСКЗА, ВМО, МПП, ФАО, МПП, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО
8	Повторное использование сточных вод	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ФАО, МБРР	ДЭСР, ВОЗ	ЭКА, ЕЭК, ВОЗ, МБРР, Хабитат			ЭСКАТО	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЭСКЗА, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО

Таблица 5.4 (*продолжение*)

9	Комплексная эксплуатация водных ресурсов	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЭСКАТО, ФАО, ВОЗ, МПП, МБРР	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЭСКАТО, ВОЗ, МБРР, Хабитат	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЭСКАТО, МБРР	ЭКА, ЕЭК, ЭСКАТО, МБРР	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЭСКАТО, ЭСКЗА, МПП, МБРР, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЭСКАТО, ЮНЕСКО, ФАО, ВМО, МПП, МБРР	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЭСКАТО, ЭСКЗА, МПП, МБРР, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО
10	Управление водопользованием	ДЭСР, ФАО, ЭКА, ЕКЛАК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, МБРР	ДЭСР, ЭКА, ЕКЛАК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, МУНИУЖ, ВОЗ, МБРР, Хабитат	ДЭСР, ЭСКАТО, МБРР	ЭКА, ЕКЛАК, МБРР	ЭКА, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ФАО, ЮНЕСКО, ВМО, МБРР	ЭКА, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ФАО, ЮНЕСКО, ВМО	ДЭСР, ЭКА, ЕКЛАК, ЭСКАТО, МУНИУЖ, ЮНЕСКО, ВМО

Таблица 5.4 (*продолжение*)

11	Управление отведением и очисткой сточных вод	ЭКА, ЕЭК, ФАО, ВОЗ, МПП	ЭКА, ВОЗ, МБРР, Хабитат	ЭКА, ЕЭК, ВОЗ, МБРР, Хабитат				ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЭСКЗА, ВМО, Хабитат, ЮНЕСКО
12	Укрепление институтов	ЭКА, ЕКЛАК, ФАО, МБРР	ЮНИСЕФ, ЭКА, ЭСКАТО, ЕКЛАК, ВОЗ, МБРР, Хабитат	ЭКА, ЕКЛАК, МБРР	ЭКА, ЕКЛАК МБРР	ЭКА, ЭСКАТО МБРР	ЭКА, ЕКЛАК, ЮНЕСКО, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО	ЭКА, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ФАО, МБРР, Хабитат, ЮНЕСКО, ВМО
13	Законодательная деятельность	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ФАО	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ВОЗ, Хабитат	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК	ЭКА, ЕЭК, ЭСКАТО ФАО, Хабитат	ЭКА, ЭСКАТО, ФАО	ДЭСР, ЭКА, ЕЭК, ЕКЛАК, ЭСКАТО, ЭСКЗА, ФАО, МБРР, Хабитат

Таблица 5.4 (*продолжение*)

14	Образование и подготовка кадров	ЭКА, ДЭСР, МУНИУЖ, ЮНИСЕФ, ФАО, ЭКА, ВОЗ, МБРР	ЭКА, ДЭСР, МУНИУЖ, ЮНЕСКО, ЭСКАТО, МПП, МБРР	ЭКА, ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, МПП, ЮНЕСКО, БМО, МБРР, Хабитат	ЭКА, ЭСКАТО, ФАО, МПП, ЮНЕСКО, БМО, МБРР, Хабитат	ЭКА, ЭСКАТО, ФАО, МПП, МУНИУЖ, ЮНЕСКО, БМО, МБРР, Хабитат	ЭКА, ЕКЛАК, ЭСКАТО, МУНИУЖ, ЮНЕСКО, БМО, МБРР, Хабитат
15	Развитие трудовых ресурсов	ЭКА, ДЭСР, МУНИУЖ, ЮНИСЕФ, ФАО, ЭКА, ВОЗ, ЭСКАТО, МБРР, МБРР	ЭКА, ДЭСР, МБРР, Хабитат	ЭКА, ЭСКАТО, МБРР, Хабитат, ЮНЕСКО, БМО	ЭКА, ЭСКАТО, МБРР, Хабитат, ЮНЕСКО, БМО	ДЭСР, ЭКА, ЭСКАТО, МБРР, ФАО, БМО, МБРР	ЭКА, ЭСКАТО, МУНИУЖ, МБРР, Хабитат, ЮНЕСКО, БМО

- f) контроль за наводнениями;
- g) борьба с засухой;
- h) многоцелевое использование воды.

Дополнительная информация об участии каждой организации, а также о масштабах и характере деятельности организаций системы ООН по освоению водных ресурсов с примерами типичных проектов, выполняемых ими, приводятся в *The United Nations Organizations and Water* [3], *The United Nations Organizations and Water: Briefing Notes on the Scope and Nature of the Activities of the Organizations of the United Nations System* [2]. (Организации ООН и Вода и Организации ООН и Вода: пояснения к характеру и сфере деятельности организаций системы ООН).

#### **5.4 Соглашения по сотрудничеству между организациями на глобальном, региональном и отраслевом уровнях**

Для выполнения своей роли и дополнительного наращивания усилий по оказанию помощи развивающимся странам, организации системы ООН имеют официальные соглашения по кооперации и сотрудничеству во многих программах, включая программы по водным ресурсам. Как видно из таблицы 5.5, некоторые из этих соглашений носят всесторонний характер в сфере деятельности, которая полностью охватывает область освоения и изучения водных ресурсов и включает многостороннее сотрудничество на глобальном и региональном уровнях. Другие носят узко отраслевой характер и включают двустороннее или многостороннее сотрудничество по отдельным аспектам освоения и изучения водных ресурсов. Дополнительные подробности по этим соглашениям о сотрудничестве между организациями приведены в [3] и [2].

Широкомасштабное сотрудничество в области водных ресурсов значительно облегчается благодаря деятельности Межсекретариатской группы по водным ресурсам Административного комитета ООН по координации, являющейся координирующим центром сотрудничества ООН в этой области. Межправительственные организации, перечисленные в таблице 5.1, и региональные экономические комиссии ООН — в таблице 5.2, являются членами Межсекретариатской группы.

Конкретным примером сотрудничества между организациями является Совместный комитет ВМО/ЮНЕСКО по связям в гидрологической деятельности, который содействует сотрудничеству обеих организаций в области деятельности, связанной с водными ресурсами; такое взаимодействие между организациями и их программами по гидрологии и водным ресурсам (см. рисунок) является особенно важным [5]. Сотрудничество, в котором ЮНЕСКО сосредоточивает свои усилия на научных исследованиях и образовании, а ВМО — на оперативной гидрологии и оперативных службах, служит примером расширения возможностей в этой сфере деятельности.



Организационная связь между ВМО и ЮНЕСКО

## 5.5 Неправительственные организации (НПО)

Это такие международные организации, в основе которых не имеется межправительственного соглашения. Они включают организации, которые принимаются членами в результате указаний правительственныйных органов при условии, что такое членство не мешает свободному выражению мнений организаций. Неправительственные организации, занимающиеся проблемами гидрологии и водных ресурсов, в алфавитном порядке перечислены в таблице 5.6 . Они могут относиться к любой из следующих категорий:

- федерации (объединения) международных организаций;
- всемирные членские организации;
- межконтинентальные членские организации;
- региональные членские организации;
- полуавтономные органы;
- организации особого вида.

В таблице 5.6 представлены:

Таблица 5.5

**Соглашения по широкосистемному (глобальному, региональному) и отраслевому (двустороннему и многостороннему) сотрудничеству в освоении водных ресурсов\***

<i>Название</i>	<i>Сфера деятельности</i>	<i>Участвующие организации</i>
Административный комитет по координации подкомитета по водным ресурсам (АКК ПКВР)	Всестороннее сотрудничество по всему комплексу водных проблем	Все организации, действующие в сфере водных ресурсов
Основные положения соглашения:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Мониторинг Плана действий, принятого на конференции в Мар-дель-Плате</li> <li>2. Содействие в координации действий по совместному планированию и пересмотру программ по вопросам, связанным с водными проблемами</li> <li>3. Содействие в сотрудничестве по осуществлению деятельности по освоению водных ресурсов на государственном и региональном уровнях</li> </ol>	
Руководящий комитет по водоснабжению и санитарному контролю	Координация деятельности по водоснабжению и санитарному контролю	Региональные комиссии ООН, ЮНИСЕФ, ПРООН, ЮНЕП, Хабитат, МУНИУЖ, ФАО, ЮНЕСКО, ВОЗ, МБРР, БМО, МКР
Основные положения соглашения:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Содействие водоснабжению и санитарному контролю на глобальном уровне, особенно в рамках программ организаций системы ООН, а также в рамках ресурсного и экологического планирования и управления</li> <li>2. Непрерывный и эффективный контроль за потребностями и ходом дел в решении национальных, региональных и глобальных задач</li> <li>3. Обеспечение непрерывных и эффективных консультаций среди организаций системы ООН посредством обмена информацией о политике, программах, критериях и подходах, а также путем распространения информации</li> </ol>	

\* По состоянию на 1992 г.

Таблица 5.5 (*продолжение*)

Межучрежденческая целевая группа по Азии и зоне Тихого океана	Вся деятельность, связанная с водой	ЭСКАТО, ООН/ДЭСР, ЮНЕП, ЮНИСЕФ, ЮНИДО, ПРООН, ФАО, МБРР, МОТ, ЮНЕСКО, ВОЗ, ВМО, МКР, МБР, Комитет по Меконгу
Основные положения соглашения:	Содействие сотрудничеству между организациями в области водных ресурсов на региональном уровне	
Назначенные должностные лица по экологическим вопросам (DOEM)	Координация всей деятельности в области экологических проблем, включая деятельность по освоению водных ресурсов	Все заинтересованные организации
Основные положения соглашения:	Содействие сотрудничеству между организациями	
ФАО/Мировая продовольственная программа	Обеспечение продовольствием проектов содействия социальному и экономическому развитию, включая ирригацию	ФАО и Мировая продовольственная программа
Основные положения соглашения:	Мобилизация и распределение поставок и запасов продовольствия для: 1. развития людских ресурсов в программах детского питания и школьных завтраков 2. инфраструктуры	
Программа сотрудничества Всемирного банка и ФАО	Проект по определению и подготовке капиталовложений в сельское хозяйство	Всемирный банк и ФАО
Основные положения соглашения:	Сочетание кадровых ресурсов и накопленного опыта при определении и подготовке проектов капиталовложений для финансирования Всемирным банком; вклад ФАО вносится через собственный инвестиционный центр	

Таблица 5.5 (*продолжение*)

Программа сотрудничества Всемирного банка/ЮНЕСКО	Проект по определению капитало- вложений в сектор образование	Всемирный банк и ЮНЕСКО
Основные положения соглашения:	Совместные обязательства по оценке и подготовке проектов в области образования	
Всемирный банк/ВОЗ Рабочее соглашение по водообес- печению и санитарному контролю	Предварительные инвестиции в деятельность, связанную с водообес- печением, канализацией и ливневым дренажем	ВОЗ и Всемирный банк
Основные положения соглашения:	Совместные обязательства по предварительному финансированию научных исследований и миссий в развивающиеся страны, являющиеся членами обеих организаций	
Всемирный банк/ЮНИДО	Определение и подготовка проектов по производительности труда малых промышленных предприятий	Всемирный банк и ЮНИДО
Основные положения соглашения:	Совместные научные исследования и миссии для оценки и подготовки проектов, с особым упором на поддержание занятости, производительности труда на малых промышленных и строительных предприятиях, включая небольшие гидро- электростанции	
Рабочее соглашение Всемирного банка/ИФАД	Подготовка и оценка проектов сельско- хозяйственного и сельского развития	Всемирный банк и ИФАД
Основные положения соглашения:	Помощь Всемирного банка в подготовке, оценке и контролировании проектов, финансируемых ИФАД или ИФАД совместно со Всемирным банком	

Таблица 5.5 (*продолжение*)

Рабочее соглашение в области гидрологии и долгосрочного сотрудничества между Секретариатами ЮНЕСКО и ВМО	Долгосрочное сотрудничество в области гидрологии	ЮНЕСКО и ВМО
Основные положения соглашения:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Поддержание и развитие сотрудничества во всех областях гидрологии</li> <li>2. Установление тесного сотрудничества с соответствующими программами по гидрологии (ПОГ ВМО и МГП ЮНЕСКО)</li> </ol>	
Рабочее соглашение ФАО/ВМО в области гидрологии и водных ресурсов	Гидрология и ее применение в сельском хозяйстве	ФАО и ВМО
Основные положения соглашения:	Общее разделение ответственности между двумя организациями по сбору и анализу гидрологических и метеорологических данных	
ВОЗ/ФАО/ЮНЕП Меморандум о взаимопонимании, касающийся болезней, передаваемых через воду, в сельскохозяйственном водопотреблении	Учреждение процедур сотрудничества и совместных действий по предотвращению и контролю за возникновением носителей болезней	ФАО, ВОЗ, ЮНЕП. Также поддерживается сотрудничество с другими организациями
Основные положения соглашения:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Организация встреч для проверки программы действий и определения мер</li> <li>2. Обмен информацией, проектными данными, краткими сводками по странам</li> <li>3. Подготовка руководящих указаний и обучение</li> </ol>	

Таблица 5.5 (*продолжение*)

ФАО/ВОЗ Меморандум о взаимопонимании, касающийся сельскохозяйственного развития и снабжения питьевой водой в сельских условиях	Обучение сельских рабочих и объединение в программах сельского развития вопросов снабжения питьевой водой и санитарии в сельских условиях	ФАО и ВОЗ с возможностью сотрудничества с другими организациями
Основные положения соглашения:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Совместное планирование и осуществление проектов, включающих коммунальное водоснабжение и мелиорацию в сельских районах</li> <li>Проведение научных исследований и подготовка кадров в областях применения соответствующих технологий и эффективности сельского водоснабжения и санитарного контроля</li> </ol>	
Межсекретариатское соглашение ФАО/ЮНЕСКО по гидрологии и водным ресурсам	Программы по гидрологии и освоению водных ресурсов	ФАО, ЮНЕСКО
Основные положения соглашения:	<ol style="list-style-type: none"> <li>Регулярные консультации по согласованию планирования программ работы в общих областях</li> <li>Обмен мнениями и информацией по вопросам гидрологии и водных ресурсов</li> </ol>	
Объединенный комитет ЮНИДО/ЮНЕП	Координация работы по промышленному водопотреблению и экологические аспекты промышленного развития	ЮНИДО, ЮНЕП
Основные положения соглашения:	Комитет проводит ежегодные совещания с целью координации деятельности	

Таблица 5.6

**Международные неправительственные организации, занимающиеся проблемами гидрологии и водных ресурсов\***

<i>Название</i>	<i>Сокращение</i>	<i>Адрес</i>
Международная ассоциация гидрогеологов	МАГ	National Rivers Authority, 550 Steetsbrook Road, Solihul, West Midlands, B91 1QT, U.K.
Международная ассоциация седиментологов	MAC	Universite de Liege, Place du Vingt-Aout 7, B-4000 Liege, Belgium
Международная ассоциация теоретической и прикладной лимнологии	МАТПЛ	Sil Secretariat/Central Office, Department of Biological Sciences, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama 35487-0344, U.S.A.
Международная ассоциация по водному праву	МАВП	Via Montevideo 5, I-00198 Rome, Italy
Международная ассоциация по качеству воды	МАКВ	Alliance House, 29-30 High Holborn, London WC1V 6BA, U.K.
Международный совет научных союзов	MCHC	Bd. de Montmorency 51, F75016 Paris, France
- Комитет по космическим исследованиям	КОСПАР	см. MCHC
- Комитет по науке и технике в развивающихся странах	КОСТЕД	см. MCHC
- Комитет по научно-техническим данным	КОДАТА	
- Комитет по исследованию водных ресурсов (MCHC/CMTA)	КОВАР	CHO-TNO, P.O. Box 6067, 2500 JA, Delft, The Netherlands
- Научный комитет по проблемам окружающей среды	СКОПЕ	см. MCHC

\* По состоянию на 1992 г.

Таблица 5.6 (*продолжение*)

Международный географический союз (член MCHC)	МГС	University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada T6G 2H4
Международный институт прикладного системного анализа	МИПИСА	A-2361 Laxenburg, Austria
Международная ассоциация по исследованию и контролю загрязнения воды	МАИКЗВ	1 Queen Anne's Gate, London SW1H 9BT, U.K.
Международная организация стандартизации	ИСО	1, rue de VarembO, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Международное общество почвоведения	МОП	P.O. Box 353, 9 Duivendaal, 6700 AJ Wageningen, The Netherlands
Международный учебный центр по управлению водными ресурсами	МУЦУВР (СЕФИГРЕ)	BP 13, Sophia Antipolis, F-06561 Valbonne CEDEX, France
Международный союз охраны природы и природных ресурсов	МСОП	Avenue du Mont-Blanc, CH-1196 Gland, Switzerland
Международный союз геодезии и картографии (член MCHC)	МСГТ	Observatoire Royal, avenue Circulaire 3, B-1180 Brussels, Belgium
- Международная ассоциация гидрологических наук	МАГН	P.O. Box 6067, 2500 JA, Delft, The Netherlands
- Международная ассоциация метеорологии и физики атмосферы	МАМФА	National Centre for Atmospheric Research , P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307 U.S.A.
Международный союз геологических наук (член MCHC)	МСГН	Maison de la Geologie, Rue Claude-Bernard 7 F-75005 Paris, France

Таблица 5.6 (*продолжение*)

Международная ассоциация по водным ресурсам	MABP	University of Illinois, 205 North Mathews Avenue, Urbana, IL 61801 U.S.A.
Международная ассоциация по водоснабжению	MAB	1 Queen Anne's Gate, London SW1H 9BT, U.K.
Международная комиссия по сельскохозяйственной технике	MKCxT	CHO-TNO, P.O. Box 6067, 2600 JA Delft, The Netherlands
Международный союз теоретической и прикладной химии	MCTПХ	Bank Court Chambers, 2-3 Pound Way, Templars Square, Cowley, Oxford OX4 3YF, U.K.
- Международная ассоциация гидравлических исследований	МАГИ	Rotterdamseweg 185, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, The Netherlands
- Международная комиссия по крупным плотинам	МККП	Bd. Haussmann 151, F-75008 Paris, France
- Международная комиссия по ирригации и дренажу	МКИД	48 Nyaya Marg, Chanakyapuri, New Delhi 110021, India
- Всемирная энергетическая конференция	ВЭК	34 St. James Street, London SW1A 1HD, U.K.
Постоянно действующая международная ассоциация конгрессов по навигации	ПМАКН	WTC-Tour 3, 26e Otage, Boulevard S. Bolivar 30, B-1210 Brussels, Belgium
Союз международных технических ассоциаций	CMTA	Unesco, 1 rue Miollis, F-75015 Paris, France

- a) графа 1 — Название организации;
- b) графа (2) — Принятое сокращение;
- c) графа (3) — Адрес организации: это адрес международного секретариата, или адрес для основной связи по состоянию на 1992 год. Некоторые секретариаты чередуются или меняют адреса в зависимости от изменения состава руководящих органов.

#### 5.6 Сотрудничество между учреждениями по бассейнам международных рек и озер

Существует множество международных соглашений и договоров, посвященных совместному использованию международных рек и трансграничных водных ресурсов. Результатом многих из этих соглашений явилось сотрудничество между учреждениями заинтересованных стран. Перечень основных международных учреждений этого типа можно найти с помощью *Наставления по ИНФОГИДРО* [6].

#### Список литературы

1. Организация Объединенных Наций, 1992: *Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде: Проблемы развития в XXI веке*. Дублинское заявление и Отчет конференции, 26–31 января 1992 г., Дублин, Ирландия.
2. United Nations, 1992: *The United Nations Organizations and Water: Briefing Note on the Scope and Nature of the Activities of the Organizations of the United Nations System* (in preparation).
3. United Nations, 1982: *The United Nations Organizations and Water*, 83-00237, New York.
4. United Nations, 1992: *Conference on Environment and Development (UNCED) - Agenda 21*, Rio de Janeiro, Brazil.
5. World Meteorological Organization/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1991: Progress in the implementation of the Mar del Plata Action Plan and a strategy for the 1990s. *Report on Water Resources Assessment*.
6. World Meteorological Organization, 1987: *Hydrological Information Referral Service — INFOHYDRO Manual*. Operational Hydrology Report No. 28, WMO-No. 683, Geneva.

# ЧАСТЬ В

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОЦЕНOK

### ГЛАВА 6

#### ОБЗОР ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ

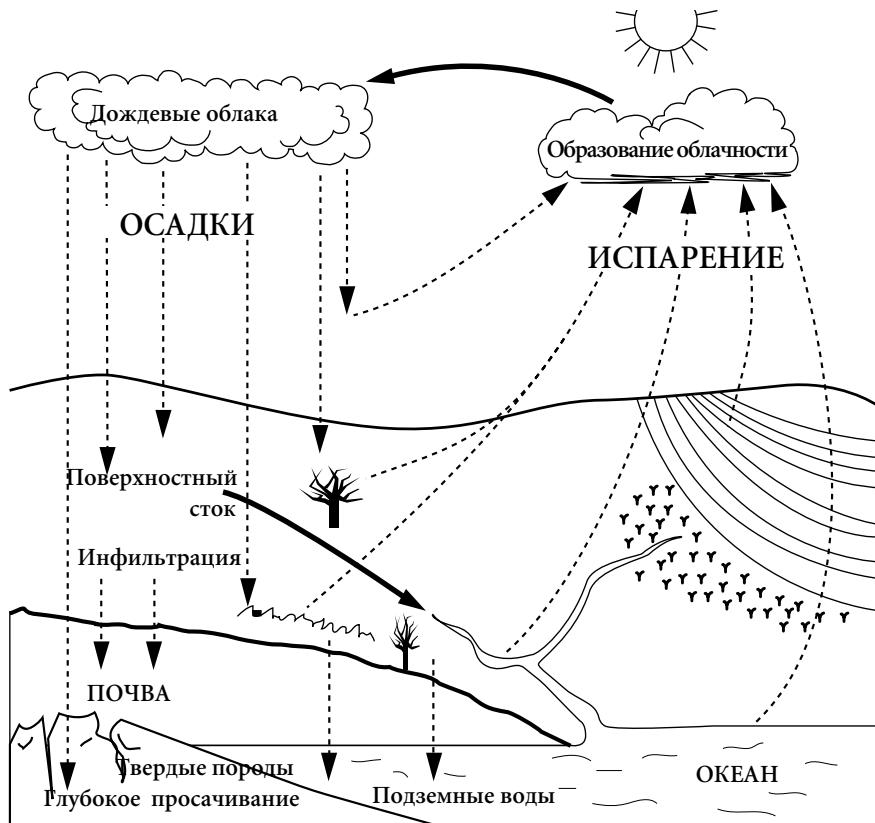
##### 6.1 Гидрологический цикл как объект наблюдений

На Земле вода присутствует в значительных количествах и находится во всех трех агрегатных состояниях: жидким, твердом и газообразном. Вода содержится в трех природных средах, одинаково доступных человеку: в атмосфере, морях и океанах, а также в массиве суши. Так как вода может легко проникать из одной среды в другую и переходить из одного агрегатного состояния в другое в соответствии со средой, в которой она оказывается, она сама является динамической средой, изменяющейся во времени и пространстве. Понятие гидрологического цикла включает в себя понятие о системе хранилищ воды на Земле, связанных между собой сетью водотоков (см. рисунок). Гидрология как наука традиционно не занималась изучением всего гидрологического цикла, а ограничивалась исследованием процессов гидрологического цикла, происходящих на суше, и их взаимодействием с океаном и атмосферой.

Как известно, большая часть жизнедеятельности человека протекает на поверхности суши, и так как вода, с одной стороны, необходима для поддержания жизни, а с другой — может проявлять себя силой, опасной для жизни человека, поэтому особое значение имеет накопление гидрологических знаний. Одним из традиционных методов их накопления является проведение измерений и оценка запасов и стока воды. Такие наблюдения проводятся в определенных местах и в указанные сроки. Результатами наблюдений являются данные измерений. Их анализируют и обобщают. Таким образом получают гидрологическую информацию и накапливают гидрологические знания. Часть D настоящего *Руководства* посвящена гидрологическому анализу.

Имеется ряд фундаментальных уравнений, выражающих физические процессы, из которых состоит гидрологический цикл, два из них могут применяться также для описания тех систем, которые используются для измерения нестационарных свойств. Этими уравнениями являются уравнения неразрывности массы и энергии. Представим, например, уравнение неразрывности массы в таком виде:

$$Q = AV. \quad (6.1)$$



Гидрологический цикл — это замкнутая система в том смысле, что вода, циркулирующая в системе, всегда остается в пределах системы. Движущей силой полного цикла служит превышение количества приходящей солнечной радиации над уходящей. Цикл состоит из таких подсистем: атмосфера, поверхностный сток и подстилающая поверхность

#### Общая концепция гидрологического цикла

Посредством этого уравнения часто определяют интенсивность стока в водотоке или канале. В этом уравнении  $Q$  — это мгновенная интенсивность стока через поперечное сечение русла площадью  $A$  и средней скоростью течения  $V$ . Обычно интенсивность стока, известную также как расход воды, нельзя измерить непосредственно в потоке, даже если он небольшой. С другой стороны, площадь поперечного сечения русла определяется посредством измерения элементарных поперечных сечений. Скорость потока измеряется гидрометрической вертушкой. Таким образом, с помощью уравнения (6.1) можно рассчитать величину расхода

даже на самых крупных реках мира. Возможности применения уравнения (6.1) подробно описываются в главе 11.

Другим примером роли уравнения неразрывности массы может служить его использование для расчета испарения воды с поверхности озер. В этом случае уравнение приобретает вид

$$P + I - O - E = \Delta S, \quad (6.2)$$

где  $P$  — это количество осадков, выпадающих на поверхность озера за период наблюдения;  $I$  — приток поверхностных и грунтовых вод за этот же период;  $O$  — расход поверхностных и грунтовых вод;  $E$  — количество воды, испарившейся с поверхности озера за наблюдаемый период; и  $\Delta S$  — изменение объема воды в озере за период наблюдения.

Методика измерения количества осадков описана в главе 7, притока и расхода — в главах 10, 11, 12 и 16. Изменения объема воды в озере можно рассчитать по соотношению между уровнем и объемом воды в озере в начале и конце наблюдаемого периода. Методика измерений уровня воды обсуждается в главе 10. Таким образом, имея в результате наблюдений данные для четырех из пяти членов уравнения (6.2), оставшийся член — испарение — можно рассчитать математическим путем.

Точность результата оценки величины испарения, полученной при использовании уравнения (6.2), зависит от точности измерения величины каждого из четырех других членов уравнения. Очень часто полученный результат оказывается неудовлетворительным из-за сложных условий, связанных с измерением величины одного или нескольких членов уравнения. В этом случае полезно воспользоваться преимуществами применения уравнения неразрывности энергии для оценки величины испарения как функции величины количества энергии, необходимого для превращения жидкой воды в пар. Эта методика описывается в главе 9.

Кроме того, в этой части *Руководства* дается описание методики оценки снежного покрова и его свойств (глава 8), измерения расхода наносов (глава 13), влажности почвы (глава 15) и отбора проб воды для определения различных параметров качества воды (глава 17).

Ограничения по объему настоящего *Руководства* не позволяют осветить все проблемы в полном объеме. Для получения более подробной информации по этим вопросам читатель отсыпается к следующим изданиям: по измерению расхода воды — к *Manual on Stream Gaging* [1] (Наставление по измерению расхода воды), а по методике отбора проб — к *GEMS/Water Operational Guide* [2] (Оперативное руководство по ГСМОС/Воде). Несмотря на то что существующие международные стандарты ИСО не являются обязательными для всех, читателю рекомендуется также ознакомиться с международными стандартами, касающимися методов измерения потоков в открытых руслах. ИСО разработано свыше 26 стандартов [3].

для различных типов и методов измерений. Полезные сведения также можно найти в трудах международных научных симпозиумов по вопросам гидрометрии, организуемых МАГН, ВМО и ЮНЕСКО.

В данной части *Руководства* содержится описание различных приборов и методов наблюдений гидрологических характеристик. На практике продолжают использоваться многие классические методы измерений, описание которых приводится в настоящем *Руководстве*. И это происходит, несмотря на появление новых технологий. Выбор новых технологий необходимо проводить на основе уже имеющегося большого набора приборов и методов наблюдений, список которых продолжает расширяться. В настоящее время существует естественная тенденция, заключающаяся в том, что гидрологические службы не спешат внедрять в практику новые технологии из-за больших расходов на приобретение оборудования и обучение персонала. Гидрологические службы, как правило, предпочитают сохранять свое приборное оснащение как можно более однородным с тем, чтобы свести к минимуму трудности, связанные с обучением персонала и техническим обслуживанием.

## 6.2 Новые технологии

В последующих главах настоящего *Руководства* рассматриваются доказавшие свою эффективность технологии, которые уже широко используются в практической деятельности во многих районах мира. Однако, как указано выше, все новые и новые технологии появляются в настоящее время. В данном разделе рассмотрены несколько таких новых технологий с тем, чтобы гидрологические службы могли ориентироваться в своих возможностях.

### 6.2.1 Дистанционное зондирование

Для гидрологических измерений обычно используются два вида методов дистанционного зондирования: активный (луч, направленный на цель, и анализ реакции цели) и пассивный (анализ естественного излучения объекта).

В активных методах может использоваться высокочастотное электромагнитное излучение (радиолокатор) или акустическое излучение (ультразвуковые устройства). Аппаратура может быть установлена на поверхности земли (радиолокатор, ультразвуковое устройство), на самолетах или на спутниках (радиолокатор). Оптические устройства (лазеры) пока еще не получили широкого распространения в гидрологии. Активное дистанционное зондирование осуществляется для измерений по площади, хотя можно его использовать и для точечных измерений (ультразвуковые).

В пассивных методах используется электромагнитное излучение (в диапазоне от инфракрасного до фиолетового и в редких случаях ультрафиолетовое). Чаще всего в настоящее время применение основано на использовании многоспектрального

сканирующего устройства, которое можно устанавливать как на самолетах, так и на спутниках, что применяется чаще. Пассивное зондирование — всегда площадное.

В настоящее время радиолокатор используется для измерений интенсивности осадков над определенными районами. Другие возможности применения дистанционного зондирования в гидрологии все еще ограничены, хотя его можно использовать для измерения площади водных объектов и степени затопления территорий. Кроме того, использование сверхвысоких частот (микроволн), вероятно, представляет определенный интерес для дистанционного измерения влажности почвы.

### 6.2.2 *Микроэлектроника*

Обзор микроэлектронной промышленности, ее технических качеств, а также приобретение и обслуживание микроэлектронных технологий помогает лучше понять возможности ее применения для гидрологического приборного оснащения. Нет необходимости в том, чтобы гидрологические службы обладали знаниями в области проектирования и изготовления гидрологических приборов, основанных на микроэлектронных схемах.

Микроэлектронная промышленность весьма динамична. С каждым годом разрабатывается все больше новых электронных компонентов и устройств, а также создаются новые фирмы по их производству. Ежегодно предлагаются новые и более разносторонние коммерческие изделия, нередко по более низкой цене, чем те технологии, которые они заменяют. Это происходит благодаря новым разработкам промышленных и проектных технологий и экономии за счет уменьшения цены комплектующих изделий или изделия целиком, если это изделие выпускается в больших количествах. Низкая цена за единицу изделия получается в этом случае за счет того, что стоимость проектирования и налаживания производства приходится на большое количество выпускаемых единиц изделия.

Также важно знать, что производство многих существующих комплектующих и изделий из них не прерывается каждый год.

К сожалению, спрос на гидрологические приборы невелик по сравнению с другими коммерческими рынками. Таким образом, стоимость таких приборов не зависит от экономии на объемах выпускаемых изделий до такой степени, которой достигают многие другие рынки.

Гидрологические приборы также должны работать без оператора, потреблять мало энергии и выдерживать условия с большим разбросом температур, влажности, запыленности и других внешних факторов. Все это существенно влияет на стоимость единицы изделия. Некоторые микроэлектронные устройства, разработанные для использования в суровых внешних условиях, например для армии, нередко находятся в диапазоне стоимости, намного превышающем диапазон покупательной способности многих гидрологических служб.

Имеется большая группа серийных гидрологических приборов. Многие из них поставляются малыми и средними специализированными компаниями. Каждая компания издает литературу о функциональных экологических стандартах и стандартах совместимости, которым удовлетворяет данный прибор. Покупатель должен убедиться, что приобретаемый им прибор отвечает всем указанным условиям.

### 6.2.3 *Микропроцессоры*

С технической точки зрения микропроцессоры — это компьютеры. Они стали применяться для сбора гидрологических данных в середине 70-х годов, когда начали выпускаться платформы сбора данных (ПСД) для накопления и передачи гидрологической информации.

Использование микропроцессоров позволяет:

- a) корректировать в реальном времени сигналы, получаемые от датчика;
- b) рассчитывать в поле первичную информацию по данным наблюдений (например: расчет средних величин, выделение экстремальных величин);
- c) преобразовывать сигнал датчика в другие параметры (например уровень воды в расход по кривой расхода);
- d) изменять программы измерения (например частоту измерений в соответствии с величиной параметра).

Микропроцессоры весьма полезны для облегчения применения других методов измерения (например использование метода движущегося судна при измерении расхода воды), а также при работе, когда в реальное время наблюдения осуществляются различные процедуры расчета данных.

### 6.2.4 *Многопараметрические накопители данных*

Многопараметрический накопитель данных обладает следующими функциональными характеристиками: измерение, накопление и контроль и телеметрия гидрологических данных (во многих приборах). Эти три функции отражены в схеме накопителя данных. Как указывает само название, многопараметрический накопитель данных предусматривает возможность интегрирования данных из двух и более измерительных подсистем, связанных с подсистемой накопления и контроля данных. Накопители данных должны взаимодействовать с другими внешними устройствами такими, как источники энергии, сами гидрологические объекты, мониторы и операторы, которые могут осуществлять ручное взаимодействие с подсистемой.

Функциями гидрологическо-измерительной подсистемы являются получение характеристик воды и выдача их в форме данных, которые можно видеть на экране монитора, их запись и обработка. Например, механические измерения уровня воды можно выполнять при использовании поплавка, т. е. устройства, которое автоматически

движет самописец по ленте регистратора или перфорирует бумажную ленту, в то время как микроэлектронные системы генерируют электрический сигнал. Механическое устройство для измерения уровня воды также может выдавать данные на экран, и дежурный оператор может непосредственно следить за текущими величинами изменений уровня воды. Более современные подсистемы основаны на других методах измерений.

Подсистемы накопления и контроля многопараметрического накопителя данных принимают сигналы от двух или более измерительных подсистем и накапливают их в форме, пригодной для дальнейшей выборки, анализа или телеметрии. Эти сигналы могут передаваться как в непрерывном режиме, так и в установленные сроки или нерегулярно. Команда о передаче данных может поступить с любой стороны межсистемного интерфейса. Передача данных через интерфейс должна быть точно определена для каждой подсистемы, и эти данные должны быть совместимы между собой.

Многие современные подсистемы накопления и контроля могут осуществлять комплексный анализ данных в реальном масштабе времени и использовать эти анализы для проведения расчетов по получаемой информации, для уплотнения данных или производства каких-то иных действий. Например, некоторые подсистемы могут собирать данные о быстро меняющихся условиях, таких как скорость и направление ветра, обрабатывать и скорее накапливать статистический материал, а не отдельные величины.

Эти подсистемы могут осуществлять определенный автоматический контроль на основе данных, получаемых от измерительных приборов. Современные подсистемы способны посыпать контрольные сигналы к измерительным подсистемам и, таким образом, способствовать накоплению дополнительных данных или посыпать контрольные сигналы к телеметрической подсистеме, инициируя передачу предупреждения или сообщения об опасности.

Кроме того, многопараметрические накопители данных, снабженные телеметрическими устройствами, могут иметь режим работы, который можно менять на расстоянии с помощью телеметрической системы.

Гидрологические телеметрические подсистемы также состоят из трех элементов: оборудование удаленной станции; система связи, т. е. телефонные линии или радиосвязь; и центральная принимающая станция. Под оборудованием удаленной станции принимается многопараметрический накопитель данных, о котором говорилось выше. Ниже обсуждается телеметрическая подсистема удаленной станции.

В некоторых конфигурациях предусмотрена двусторонняя связь между удаленной гидрологической станцией и центральной принимающей станцией. В других случаях система предусматривает только одностороннюю связь между удаленной и центральной принимающей станциями. В первом случае, удаленная станция запрашивается, и ейдается команда о передаче данных. Во втором случае, удаленная станция начинает

передавать данные по истечении установленного срока, или когда количество накопленной информации превышает заданную величину. Передача данных по истечении установленного срока может происходить после окончания фиксированного или случайного интервала времени.

Существующие гидрологические телеметрические подсистемы основаны на применении СВЧ, радио или телефонной связи. При СВЧ связи передача данных может происходить в пределах прямой радиовидимости, а радиопередача на других частотах может идти как в пределах радиовидимости, так и через промежуточные средства связи. Такими средствами могут служить наземная линия связи или спутниковая связь.

В телеметрических подсистемах существуют требования в отношении соответствия удаленных систем стандартам связи передающей среды. Например, характеристики отдельных типов телефонных линий могут обеспечивать только определенные скорости передачи данных, и телеметрическая система должна соответствовать этим скоростям. Подобно этому, для использования спутниковой связи для ретрансляции данных, необходимо иметь дистанционную систему для передачи данных в диапазоне точно определенных пределов излучаемой энергии, скорости передачи данных и других стандартов связи. Все эти параметры, естественно, задаются оператором спутника.

Ключевыми характеристиками многопараметрического накопителя данных являются: аппаратные средства; программное обеспечение; физические характеристики: размер, вес, мощность.

Под аппаратными средствами принимаются микропроцессор, схемы и другие физические компоненты многопараметрических накопителей данных. Микропроцессор является главной составляющей частью микроэлектронного технического обеспечения (раздел 6.2.3). Первоначально микропроцессоры, разработанные для серийного выпуска, могли обрабатывать от четырех до восьми битов информации одновременно и назывались соответственно 4-битовыми или 8-битовыми процессорами. В дальнейшем появились 16-битовые и 32-битовые.

Микропроцессоры многопараметрических накопителей данных должны быть снабжены тщательно определенными последовательностями команд (программным обеспечением) для управления работой накопителя данных. Программное обеспечение определяет множество элементарных операций системы, а также режим работы микропроцессора с другими техническими элементами. Программное обеспечение определяет, как микропроцессор осуществляет временную synchronization, как и с какой частотой он передает данные в накопительное устройство или телеметрическую подсистему, и множество других задач. Программирование работы накопителя данных можно выполнить с помощью отдельного съемного устройства или подключением пульта, спроектированного как составная часть подсистемы накопления и контроля.

Многопараметрические накопители данных стали маленькими по размеру и легкими по сравнению с обычным гидрологическим оборудованием для сбора данных, которое они заменили. Благодаря небольшим размерам и низкому потреблению энергии, они обычно работают на батареях и могут помещаться в небольшой защитный футляр. Многие из накопителей данных снабжены экранами, на которые дежурный оператор или гидролог может вызвать информацию для оценки состояния прибора и посмотреть данные, записанные к этому моменту.

### Список литературы

1. World Meteorological Organization, 1980: *Manual on Stream Gauging*. Volumes I and II, Operational Hydrology Report No.13, WMO-No. 519, Geneva.
2. United Nations Environment Programme/World Health Organization/ United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1992: *Global Environment Monitoring System (GEMS)/Water Operational Guide*. Canada Centre for Inland Waters, Burlington, Ontario.
3. International Organization for Standardization, 1983: *Measurement of Liquid Flow in Open Channels*. ISO Standards Handbook 16, Geneva.



## ГЛАВА 7

### ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ

#### 7.1           **Общие требования**

Общее количество осадков, достигающих почвы за определенный период времени, выражается высотой слоя, которым они покрыли бы горизонтальную проекцию земной поверхности при условии, что та часть осадков, которая выпала в виде снега или льда, растаяла. Количество выпавшего снега измеряется также высотой слоя свежевыпавшего снега, покрывающего ровную горизонтальную поверхность. Главная цель любого метода измерения осадков заключается в получении такого их количества, которое является репрезентативным для той территории, к которой относятся измерения. Гидрология предъявляет строгие требования к измерению абсолютного количества осадков. Поэтому важными обстоятельствами являются: выбор места для установки осадкомера; очертание осадкомера и условия его установки; предохранение от потерь, вследствие испарения, воздействия ветра и разбрызгивания.

В данной главе рассматриваются аспекты измерения осадков, которые наиболее важны в гидрологической практике. Более подробная информация приводится в *Руководстве по метеорологическим приборам и методам наблюдений* [1].

#### 7.2           **Размещение осадкомерных постов**

При безупречной установке осадкомера собранные им осадки будут представлять истинное количество осадков, выпадающих в данном районе. Практически, однако, это трудно достижимо из-за влияния ветра, поэтому особое внимание следует обращать на выбор места для осадкомерного поста. Воздействие ветра необходимо рассматривать с двух точек зрения: воздействие ветра непосредственно на прибор, в результате чего обычно занижается количество осадков; а также влияние самого поста на воздушный поток, что часто является более важным и может приводить к излишкам или дефициту осадков, выпадающих в месте расположения поста.

Помехи, создаваемые ветровым препятствием, зависят от соотношения линейных размеров препятствия и интенсивности осадков. Влияние систематической деформации ветрового поля может быть уменьшено, если не полностью исключено, при соблюдении следующих условий: площадка для установки прибора выбирается таким образом, чтобы скорость ветра на уровне приемного отверстия

осадкомера была возможно меньшей, но защита площадки не должна быть такой, чтобы окружающие предметы снижали количество осадков; окружение осадкомера таково, что заставляет поток воздуха проходить горизонтально над приемным отверстием осадкомера. Все осадкомеры в данном районе или данной стране должны быть установлены в аналогичных условиях, и к их размещению следует применять аналогичные критерии.

Осадкомер должен быть установлен так, чтобы его приемное отверстие было параллельно ровной горизонтальной поверхности почвы. По возможности, измерительный участок должен со всех сторон иметь защиту от ветра различными предметами (деревьями, кустарником и т. д.) примерно одинаковой высоты. Высота этих объектов над уровнем мерного отверстия осадкомера должна быть не менее половины расстояния от осадкомера до защищающих предметов, но не превышать этого расстояния (чтобы предотвратить перехват осадков). При идеальных условиях размещения осадкомера угол между верхом осадкомера и верхом защищающих объектов должен быть от  $30^{\circ}$  до  $45^{\circ}$  к горизонтальной поверхности.

Для ветровой защиты осадкомеров следует избегать таких приспособлений, как щиты, или отдельные ряды деревьев, так как они увеличивают турбулентность на измерительном участке. Не следует также устраивать изолированную или несплошную защиту из-за различных часто непредсказуемых воздействий на осадкомерную установку. Если обеспечить приемлемую защиту от ветра невозможно, то следует проследить за тем, чтобы отдельные предметы находились на расстоянии не ближе чем их четырехкратная высота. Выбирать площадку для установки осадкомера нужно с учетом приведенных ограничений, чтобы избежать погрешностей измерения, вызываемых воздействием ветра, кроме того следует соблюдать предосторожность, чтобы выбранный участок не вносил существенных искажений в скорость и направление ветра. Необходимо избегать площадок на склонах или у крутых откосов, спускающихся в одном направлении (особенно если это направление совпадает с преобладающим направлением ветра).

Поверхность, окружающая осадкомер, может быть покрыта низкой травой, гравием или галькой, но необходимо избегать твердых, гладких покрытий, например бетонных, с целью предотвращения излишнего попадания брызг в осадкомер. Приемное отверстие осадкомера должно находиться как можно ближе к поверхности земли (потому что скорость ветра возрастает с высотой), но в то же время его высота должна быть достаточной, чтобы избежать попаданий брызг с земли. В районах, где выпадает мало снега и где нет опасности, что даже при сильном ливне почва будет покрыта лужами, осадкомеры устанавливаются на высоте 30 см; такая высота принята во многих странах. Там, где не могут быть соблюдены перечисленные условия, рекомендуется устанавливать осадкомер на стандартной высоте 1 м.

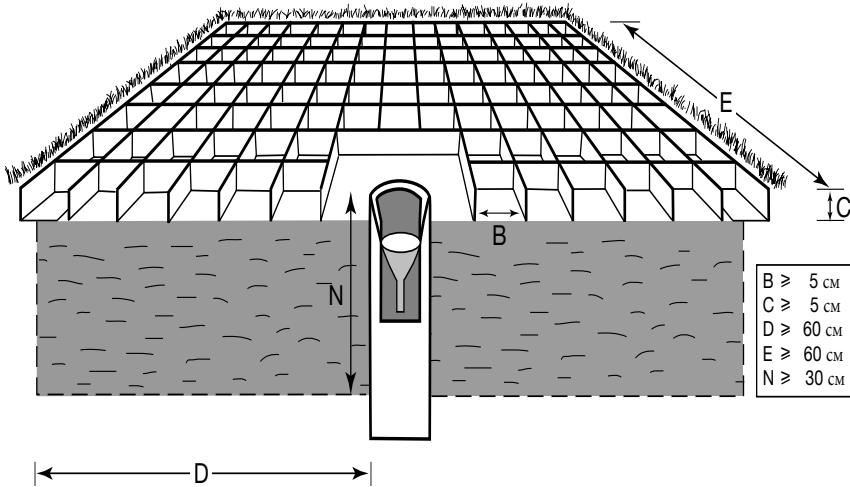


Рисунок 7.1 — Заглубленный осадкомер для измерения жидкых осадков

На очень открытых местах, где нет естественной защиты, можно получить более точные результаты при измерении жидких осадков, если приемное устройство осадкомера устанавливается на уровне земли (рисунок 7.1). Осадкомер должен быть окружен крепкой пластиковой решеткой или решеткой из нержавеющего металла, защищающей от разбрызгивания. Она должна состоять из тонких пластин высотой приблизительно в 12,5 см, установленных вертикально на расстоянии приблизительно 12,5 см симметричным квадратом. Площадку вокруг осадкомера следует разровнять во всех направлениях в радиусе не менее 100 м.

Другим менее эффективным способом является установка осадкомера в центре круглой площадки, обнесенной дерновой стенкой. Внутренняя поверхность должна быть вертикальной с радиусом около 1,5 м, а внешняя — наклонена к горизонту под углом 15°. Верхний край стенки должен находиться на уровне приемного отверстия осадкомера. Необходимо предусмотреть дренаж площадки. Следует учитывать, что наземный осадкомер предназначен для измерения жидких осадков, и его нельзя использовать для измерения выпавшего снега.

Другим способом преобразования окружения осадкомера является снабжение прибора различными видами ветровой защиты. При удачной конструкции осадкомеры с такой защитой позволяют получать значительно более репрезентативные данные, чем осадкомеры без защиты, полностью подверженные воздействию ветра. Идеальная защита должна:

- a) обеспечить параллельность потока воздуха над отверстием прибора;
- b) устранять любое локальное ускорение ветра над приемным отверстием осадкомера;
- c) насколько возможно уменьшать скорость ветра, ударяющего в боковые стенки прибора; тогда менее важна высота приемного отверстия осадкомера;
- d) не вызывать забрызгивания капель дождя в приемное отверстие; при выполнении этого условия высота приемного отверстия над поверхностью почвы не имеет решающего значения;
- e) не вызывать образования снежной шапки над осадкомером.

Осадки в виде снега подвержены неблагоприятным воздействиям ветра в значительно большей степени, чем осадки в виде дождя. В районах с особенно сильными ветрами количество снега, уловленного осадкомером с ветровой защищенной или без нее, может составлять менее половины действительного количества выпавшего снега. Площадки, выбранные для измерения количества выпавшего снега и для наблюдений за снежным покровом, должны находиться на участках, максимально защищенных от ветра. Как было показано, защита от ветра, которая устраивается возле осадкомера, должна быть весьма эффективной, чтобы свести к минимуму погрешности от ветровых воздействий, особенно для твердых осадков. Однако до настоящего времени не разработаны надежные приспособления, которые бы полностью устранили ветровые погрешности при измерении осадков.

### 7.3           **Нерегистрирующие осадкомеры**

[C27]

#### 7.3.1       **Общие положения**

Нерегистрирующие осадкомеры, применяемые большинством государственных гидрологических и метеорологических служб для обычных измерений, чаще всего представляют собой открытые приемные сосуды с вертикальными стенками, обычно имеющие форму правильного цилиндра. В различных странах используются приборы различной высоты и с приемными отверстиями различных размеров, поэтому результаты измерений, полученных с их помощью, не вполне сравнимы. Высота слоя осадков в осадкомере измеряется с помощью градированной линейки или мерного стакана. Если у осадкомера стенки невертикальны, то осадки измеряются либо путем взвешивания, либо путем определения их объема, либо путем определения их слоя с помощью измерительной линейки со специальной шкалой.

#### 7.3.2       **Стандартные осадкомеры**

Осадкомер, используемый для ежедневного измерения осадков, чаще всего состоит из коллектора (приемной части), который помещается над воронкой, соединенной с контейнером (ведро осадкомера). Размеры приемного отверстия коллектора не имеют существенного значения. В некоторых странах применяются осадкомеры с

приемным отверстием площадью 1 000 см<sup>2</sup>, но, возможно, наиболее подходящей будет площадь 200–500 см<sup>2</sup>. Площадь приемного сосуда может быть равной 0,1 площади приемного отверстия. Какой бы размер коллектора не был выбран, градуировка измерительного устройства должна ему обязательно соответствовать. Наиболее важные требования, предъявляемые к осадкомеру, — следующие:

- a) ободок коллектора должен иметь острый край и быть строго вертикальным внутри и пологим снаружи; конструкция снегомеров должна быть такой, чтобы ошибки из-за скопления мокрого снега вокруг ободка были незначительны;
- b) площадь приемного отверстия должна быть известна с точностью до 0,5 %, и конструкция осадкомера должна быть такой, чтобы эта площадь оставалась постоянной при обычном использовании осадкомера;
- c) коллектор должен быть сконструирован так, чтобы не происходило разбрызгивание дождя из него и попадание брызг в него; этого можно достичь при условии, если вертикальная стенка достаточно высока и наклон воронки достаточно пологий (по крайней мере 45°);
- d) контейнер должен иметь узкое входное отверстие и быть в достаточной мере защищенным от воздействия солнечных лучей, чтобы свести потери за счет испарения до минимума;
- e) в условиях, когда часть осадков поступает в виде снега, коллектор должен быть достаточно глубоким, чтобы накапливать осадки, поступающие в течение суток; глубина коллектора также важна для предотвращения выдувания уловленных снежных осадков.

Осадкомеры, предназначенные для установки в местах, где отсчеты по ним возможно производить только один раз в неделю или месяц, должны быть сходны по устройству с суточными осадкомерами, но иметь более вместительный приемный сосуд и более прочную конструкцию.

### 7.3.3 *Суммарные осадкомеры*

Суммарные осадкомеры используются для измерения общего количества сезонных осадков в отдаленных, малодоступных районах. Они состоят из коллектора, помещенного над воронкой, соединенной с контейнером, объем которого достаточен для того, чтобы вместить сезонный сбор. При установке этих осадкомеров и их защите от ветра следует соблюдать правила, указанные в предыдущих разделах.

В районах, где наблюдаются исключительно обильные снегопады, контейнер следует помещать на высоте, превышающей ожидаемую максимальную высоту снежного покрова. Для этой цели можно смонтировать весь осадкомер целиком на высокой опоре, или только контейнер установить на опорной стальной трубе диаметром 30 см и такой длины, чтобы контейнер возвышался над поверхностью снежного покрова при его максимальной высоте.

В контейнере может быть раствор антифриза для превращения снега, попадающего в осадкомер, в жидкость. Важно, чтобы антифриз оставался диспергированным. Смесь, состоящая по весу из 37,5 % технического хлористого кальция (степень чистоты 78 %) и 62,5 % воды, дает удовлетворительный антифриз. Кроме того, можно использовать раствор этиленгликоля. Хотя эти растворы более дорогие, они не менее коррозийные, чем хлорид кальция, и предохраняют от замерзания при большей степени разбавления, которое происходит в результате последующего попадания осадков. Объем раствора, первоначально помещаемого в контейнер, не должен превышать одной трети общего объема осадкомера.

Для уменьшения испарения в контейнер следует налить небольшое количество масла. Толщина слоя масла должна быть около 8 мм. Рекомендуются неочищенные моторные масла низкой вязкости. Были признаны неприемлемыми трансформаторные и силиконовые масла.

Сезонный сбор осадков определяется путем взвешивания или измерения объема содержимого контейнера. При том и другом способе необходимо учитывать количество антифриза, помещенного в контейнер в начале сезона.

#### 7.3.4 *Методы измерения*

Для измерения количества осадков, собранных в обычных осадкомерах, как правило, используются два приспособления: градуированный мерный стакан и градуированная рейка.

Мерный стакан должен изготавливаться из прозрачного стекла с низким коэффициентом термического расширения и иметь четкую метку, указывающую размер или тип осадкомера, с которым он должен использоваться. Его диаметр должен составлять не более одной трети диаметра приемного отверстия прибора.

Деления следует наносить четко. Вообще, деления рекомендуется наносить с интервалом 0,2 мм и четко отмечать линии каждого миллиметра. Кроме этого, желательно, чтобы была отмечена линия, соответствующая 0,1 мм. Если нет необходимости измерять осадки с такой точностью, то деления в 0,2 мм наносятся, по крайней мере, до деления 1,0 мм, а далее идут деления, соответствующие целым миллиметрам, причем каждый десяток миллиметров отмечается особенно четкой линией. Для достижения необходимой точности максимальная погрешность делений не должна превышать  $\pm 0,05$  мм около/или выше отметки 2 мм и  $\pm 0,02$  мм ниже этой отметки.

Для того чтобы измерить небольшое количество осадков с адекватной точностью, внутренний диаметр мерного стакана должен быть сужен у основания. При всех измерениях уровень воды определяется по нижнему краю его мениска. При снятии показаний мерный стакан следует держать вертикально во избежание ошибок параллакса. Нанесение основных линий деления на обратную сторону стакана также помогает уменьшить количество таких ошибок.

Мерные рейки следует изготавливать из кедра или другого подходящего материала, который мало поглощает воду и имеет незначительный эффект капиллярности. Деревянные мерные рейки непригодны в том случае, если в коллектор для уменьшения испарения добавлено масло; в этом случае рекомендуется использовать рейки из металла или других материалов, с которых легко удаляется масло. Неметаллические рейки во избежание быстрого износа должны иметь латунную ручку и градуироваться в соответствии с отношением площадей поперечного сечения приемного отверстия осадкомера и коллектора. Деления должны наноситься, по крайней мере, через каждые 10 мм, и следует предусматривать поправку на перемещение самой мерной рейки. Максимальная ошибка в градуировке мерной рейки не должна превышать  $\pm 0,5$  мм в любой точке. Измерения, проводимые при помощи мерной рейки, рекомендуется, где это возможно, проверять по мерному стакану.

Также можно измерять собранное количество осадков точным взвешиванием. Этот метод имеет некоторые преимущества. Определяется общий вес мерного сосуда и его содержимого, затем вычитается вес сосуда, который известен заранее. В этом случае нет опасности разлить воду, и любое количество жидкости, оставшейся в мерном сосуде, включается в этот вес. Но обычно используемые методы являются, однако, более простыми и дешевыми.

### 7.3.5        *Ошибки и точность отсчетов*

Если считывание показаний проводится достаточно аккуратно, то ошибки при измерениях сбора осадков будут невелики по сравнению с ошибками, возникающими из-за неудачного выбора места для поста осадкомера. Отсчеты по суточным осадкомерам следует производить с точностью до 0,2 мм или, что предпочтительнее, до 0,1 мм. По недельным или месячным осадкомерам отсчеты производятся с точностью до 1 мм. Основными источниками возможных ошибок являются: пользование неточно градуированными измерительными стаканами или линейками, проливание некоторой части воды при переливании ее из ведра в стакан, невозможность перелить всю воду без остатка из ведра в стакан.

Кроме перечисленного, ошибки могут возникнуть из-за испарения жидкости из контейнера. Эти потери достигают значительной величины только в странах с сухим жарким климатом и при редких посещениях осадкомерных постов. Потери на испарение можно снизить, если налить в ведро некоторое количество масла или сконструировать осадкомер таким образом, чтобы: поверхность испарения воды была невелика; вентиляция была незначительной; и было предотвращено чрезмерное повышение температуры внутри прибора. Кроме этого, приемная поверхность осадкомера должна быть гладкой для того, чтобы дождевые капли не приставали к ней. Ее никогда не следует красить.

В тех районах, где часто после дождей сразу наступает морозная погода, можно предупредить повреждения осадкомерного ведра и соответственно утечку собранной воды путем добавления антифриза. Как уже говорилось, это относится, главным образом, к редко посещаемым осадкомерам. Само собой разумеется, что при измерении уловленных осадков необходимо учитывать количество добавленного раствора. Все осадкомеры следует регулярно проверять на течь.

### 7.3.6 *Корректировка систематических ошибок*

В результате влияния ветра, потери на смачивание внутренних стенок коллектора, испарения жидкости из контейнера, выдувания снега и разбрзгивания дождевых капель — измеренное количество осадков обычно ниже (на 3–30 % и более), чем их фактическое количество, достигающее поверхности земли. Эта систематическая ошибка должна корректироваться, прежде чем данные будут использованы в гидрологических расчетах [2]. До введения поправки, исходные данные об осадках следует надежно заархивировать, и при публикации все данные должны быть четко обозначены, в зависимости от их назначения как «измеренные» и «корректированные».

Корректировки этих данных обычно основаны на связи компонентов ошибок с метеорологическими факторами. Например, потери осадков за счет изменения поля ветра над приемным отверстием осадкомера зависят от скорости ветра и структуры осадков. Структура осадков характеризуется, в зависимости от продолжительности периода наблюдений, как соотношение осадков малой интенсивности ( $i_p \leq 0,03 \text{ мм}\cdot\text{мин}^{-1}$ ), как логарифм интенсивности осадков, через температуру и влажность воздуха или вид осадков. Потери на смачивание внутренних стенок коллектора зависят от количества дней с осадками, а потери на испарение — от дефицита насыщения и скорости ветра. Завышение количества измеренных осадков в результате надувания снега непосредственно связано со скоростью ветра.

В том случае, если корректировки необходимо вводить ежесуточно, данные по вышеупомянутым метеоэлементам следует получать в результате метеорологических наблюдений, проводимых на метеоплощадке, где проводилось измерение осадков, или в непосредственной близости от осадкомерного поста. Там, где наблюдения за этими метеоэлементами не ведутся, корректировки необходимо проводить за более длительные периоды времени, например за месяц.

Величины месячных корректировок колеблются от 10 до 40 %, в зависимости от методики оценки метеорологических факторов, которые влияют на эту поправку.

Основные составляющие систематической ошибки при измерении осадков приведены в таблице 7.1.

Экспериментально рассчитанная для различных осадкомеров поправка  $k$  на изменение поля ветра над отверстием осадкомера, приведена на рисунке 7.2. Она зависит от скорости ветра во время выпадения осадков на уровне отверстия осадкомера и скорости выпадения частиц осадков, которая, в свою очередь, зависит от структуры осадков.

Таблица 7.1

**Основные компоненты систематической ошибки при измерении осадков и их метеорологические и инструментальные факторы, перечисленные в порядке их значимости**

$$P_k = kP_c = k(P_g + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \pm \Delta P_4 - \Delta P_5),$$

где  $P_k$  — скорректированное количество осадков;  $k$  — поправочный коэффициент;  $P_c$  — величина осадков, собранных в коллекторе прибора;  $P_g$  — измеренное количество осадков в осадкомере; и  $P_1 - P_5$  — поправки для компонентов систематической ошибки, которые определены ниже:

Обозначение	Составная часть ошибки	Величина	Метеорологические факторы	Инструментальные факторы
$k$	Потери по причине деформации ветрового поля над приемным отверстием осадкомера	2–10 % 10–50 % *	Скорость ветра над осадкомером во время выпадения осадков и структура осадков	Форма, площадь приемного отверстия и толщина обода осадкомера и приемного коллектора
$\Delta P_1 + \Delta P_2$	Потери жидкости за счет смачивания внутренних стенок коллектора и жидкости, остающейся в контейнере после его опорожнения	2–10 %	Интенсивность, тип и количество осадков, время высыхания осадкомера и частота опорожнения контейнера	Такие же, как в предыдущем случае, а также материал, цвет и срок службы коллектора и контейнера осадкомера
$\Delta P_3$	Потери за счет испарения из контейнера	0–4 %	Тип осадков, дефицит насыщения и скорость ветра на уровне приемного отверстия осадкомера за период, прошедший от момента прекращения осадков до их измерения	Площадь приемного отверстия и изоляция контейнера, цвет, и, в некоторых случаях, срок службы коллектора, или тип воронки (жесткий или съемный)
$\Delta P_4$	Разбрзывание или забрызгивание	1–2 %	Интенсивность дождя и скорость ветра	Форма и толщина коллектора осадкомера и тип установки осадкомера
$\Delta P_5$	Задувание снега		Интенсивность и продолжительность снежного шторма, скорость ветра и состояние снежного покрова	Форма, площадь приемного отверстия и толщина обода и коллектора осадкомера

\* Для снега.

Абсолютное значение ошибки из-за потерь на смачивание зависит от: геометрических характеристик и материала, из которого изготовлен приемный коллектор и ведро осадкомера; количества измерений осадков; количества, частоты выпадения и вида осадков. Для жидких, твердых и смешанных осадков величина поправки отличается и должна определяться взвешиванием или объемными измерениями в лабораторных условиях. Потери на смачивание для твердых осадков обычно меньше, чем для жидких, так как приемный коллектор при снеготаянии обычно смачивается только один раз.

Суммарные месячные потери на смачивание  $\Delta P_1$  можно определить по уравнению

$$\Delta P_1 = \bar{a} M, \quad (7.1)$$

где  $\Delta P_1$  — средние суточные потери на смачивание для определенного осадкомера; а  $M$  — количество дней с осадками.

В случае, когда осадки измеряются чаще одного раза в день, суммарные месячные потери равны

$$\Delta P_{1,2} = a^x Mp, \quad (7.2)$$

где  $a^x$  — средние потери на смачивание за одно измерение осадков для определенного осадкомера и вида осадков; а  $Mp$  — количество измерений осадков в течение рассматриваемого периода.

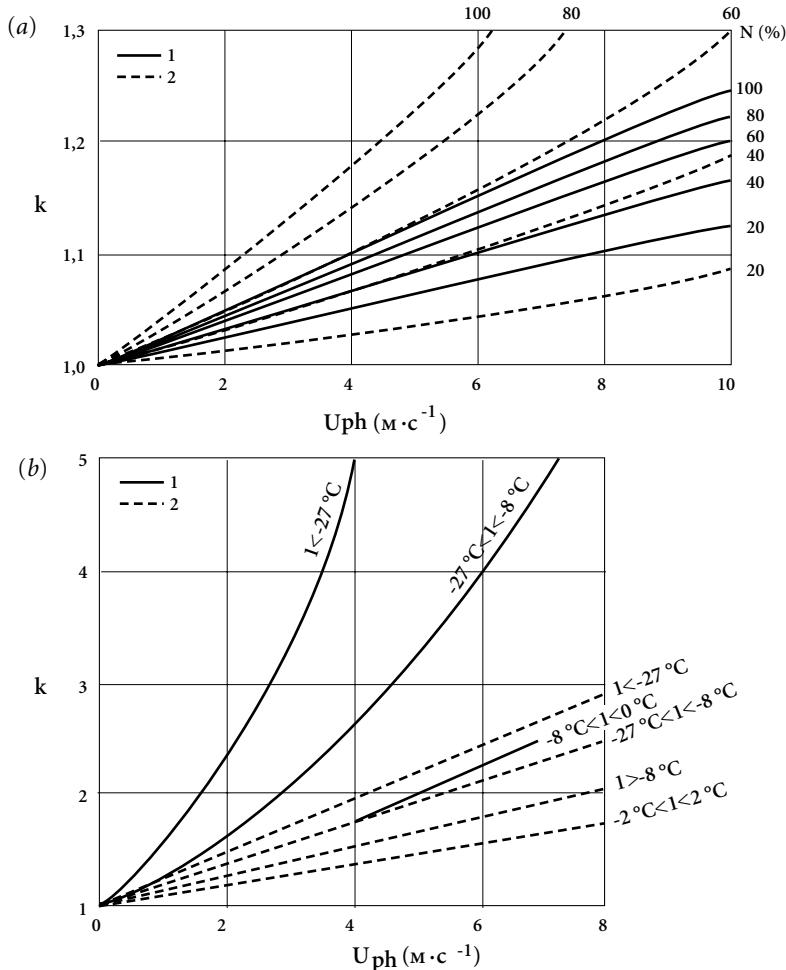
Потери на испарение можно определять следующим образом:

$$\Delta P_3 = i_e \tau_e \quad (7.3)$$

Величина  $i_e$  зависит от конструкции, материала и цвета осадкомера; вида и количества осадков; дефицита насыщения воздуха; от скорости ветра на уровне приемника осадкомера при испарении. Теоретически величину  $i_e$  трудно определить из-за сложной конфигурации осадкомера. Однако ее значение вычисляется по эмпирическому уравнению или по графику, как показано на рисунке 7.3. Величина  $\tau_e$  может быть определена при помощи самописца осадков, но она также зависит и от количества измерений за день. Ее значение для жидких осадков при измерениях дважды в день составляет от 3 до 6 часов и 6 часов для снега, поскольку испарение происходит в течение его выпадения.

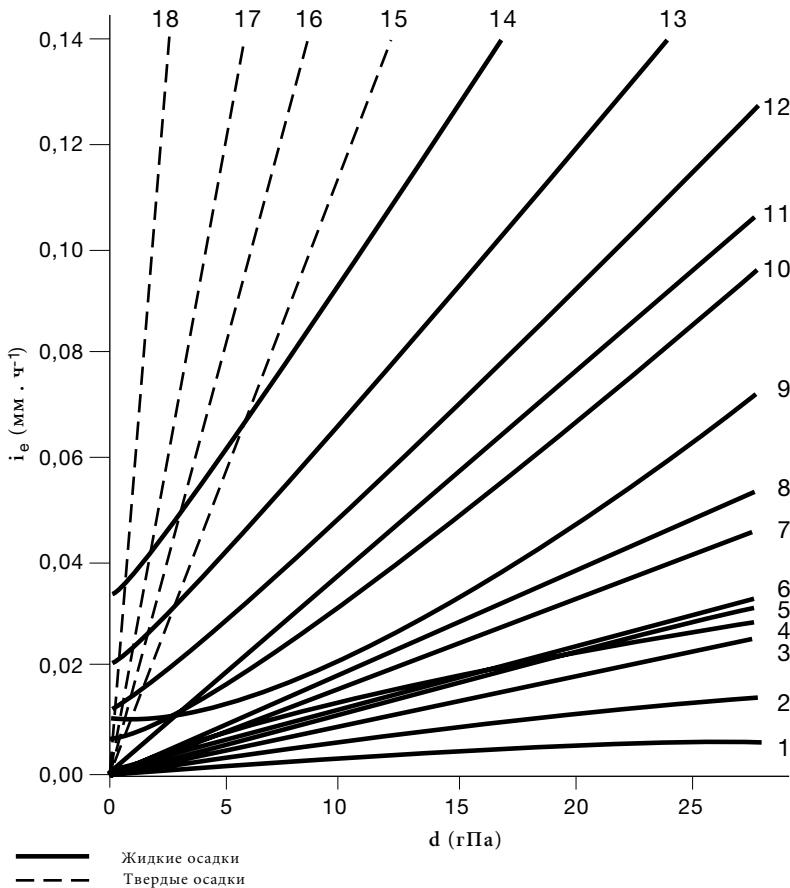
Ошибку за счет задувания снега в осадкомер следует учитывать при скорости ветра более  $5 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ее полусуточные значения могут определяться прямо у осадкомера при помощи визуальных наблюдений за продолжительностью метели, а также на основе имеющихся данных о скорости ветра и количестве дней с задуванием и выдуванием снега. Среднее значение за месячный период можно определить из графика на рисунке 7.4, если известны продолжительность и скорость ветра.

Абсолютная величина ошибки за счет выбрызгивания из ведра или попадания брызг в ведро может быть как положительной, так и отрицательной, и поэтому ее величина почти для всех типов правильно сконструированных осадкомеров принимается равной нулю (раздел 7.3.2).



Поправочный коэффициент  $k$  как функция скорости ветра за период времени выпадения осадков на высоте приемного отверстия осадкомера ( $u_{ph}$ ) и параметра структуры осадков  $N$  и  $t$  для: а) жидких осадков; б) твердых и смешанных осадков; 1 — осадкомер Хелмана без ветровой защиты; 2 — осадкомер Третьякова с ветровой защитой;  $t$  — температура воздуха во время метели;  $N$  — доля в процентах от среднемесячной суммы дождей с интенсивностью менее  $0,03 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$  [3]

Рисунок 7.2 — Поправочный коэффициент  $k$  как функция скорости ветра



Интенсивность испарения ( $i_e$ ) для различных осадкомеров: а) жидкые осадки: i) австралийский стандартный осадкомер 1, 2, 7, 11 для  $P \leq 1$  мм; 1,1 – 20 мм; > 20 мм (все для скорости ветра  $u_e < 4$  м·с<sup>-1</sup>), и для  $u_e \geq 4$  м·с<sup>-1</sup> соответственно; ii) сугговой заглубленный осадкомер 3, 6, 8 для  $P \leq 1$  мм, 1,1–10 мм и  $\geq 10$  мм соответственно; iii) осадкомер Хелмана 4; iv) польский стандартный осадкомер 5; v) венгерский стандартный осадкомер 9; vi) осадкомер Третьякова 10, 12, 13, 14 для скорости ветра на уровне приемного отверстия осадкомера от 0 до 2, 2 до 4, 4 до 6 и от 6 до 8 м·с<sup>-1</sup> соответственно; б) твердые осадки: осадкомер Третьякова 15, 16, 17, 18 для скоростей ветра от 0 до 2, 2 до 4, 4 до 6 и 6 до 8 м·с<sup>-1</sup> соответственно, где  $i_e$  — интенсивность испарения, мм·Ч<sup>-1</sup> и  $T_e$  — время, прошедшее за период между окончанием осадков и их измерением

Рисунок 7.3 — Потери в результате испарения из осадкомеров

Кроме рассмотренных систематических ошибок, существуют также случайные ошибки, возникающие в результате ошибок наблюдений и ошибок при пользовании приборами, но ими часто пренебрегают из-за их незначительной, по сравнению с систематическими ошибками, величины.

#### 7.4        Самопишущие осадкомеры

[C30]

Применяются три типа плювиографов: весовой, с самоопорожняющимся контейнером и поплавковый. Из этих трех типов самописцев осадков только весовой подходит для измерения всех видов осадков. Два других в основном используются для измерения жидких осадков.

##### 7.4.1      Весовой плювиограф

В приборах этого типа ведется постоянная запись веса контейнера вместе с собранными в нем осадками с помощью пружинных или рычажных весов. Таким образом записывается вес всего количества осадков с момента начала их выпадения. Обычно этот тип прибора не имеет приспособления для удаления из него собранных осадков, но с помощью системы рычагов можно заставить перо пересекать ленту любое количество раз. Такие приборы следует конструировать так, чтобы свести потери от испарения до минимума. Этого можно достичь путем добавления в контейнер достаточного количества масла или другого ретарданта для создания пленки на поверхности воды. Колебания весов во время сильных

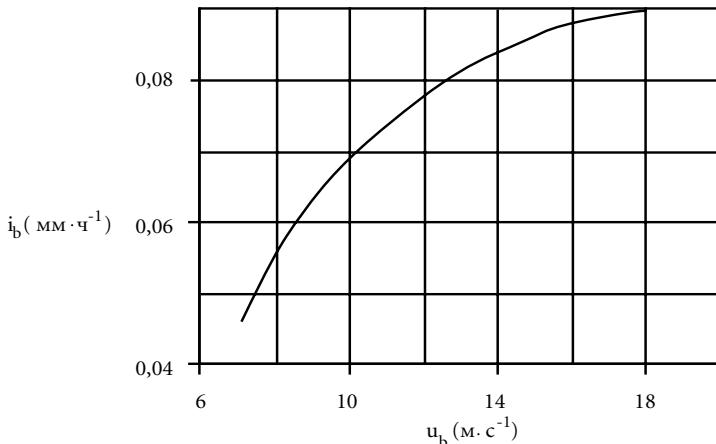


Рисунок 7.4 — Многолетняя сезонная интенсивность задувания снега ( $i_b$ ) как функция средней многолетней скорости ветра ( $u_b$ ) на уровне анемометра (10–20 м) в течение периода задувания снега

ветров можно уменьшить используя масляный демпфер. Приборы такого типа особенно полезны для записи осадков в виде снега, града и смеси снега с дождем, так как для записи количества таких твердых осадков их не нужно растапливать.

#### 7.4.2 *Поплавковый плювиограф*

В этом приборе жидкие осадки попадают в поплавковую камеру, в которой находится легкий поплавок. Когда уровень воды в камере повышается, вертикальное перемещение поплавка преобразуется при помощи специального механизма в движение пера по разграфленной бумажной ленте. Можно использовать любой масштаб записи, если соответствующим образом скорректировать размеры приемного отверстия коллектора, поплавка и поплавковой камеры.

Чтобы произвести запись за какой-либо выбранный период времени (обычно за 24 часа), необходимо иметь или очень большую поплавковую камеру (в этом случае получают сжатый масштаб записи на ленте), или какой-то механизм для автоматического быстрого слива жидкости из поплавковой камеры, как только она наполнится, для того чтобы перо вернулось к нижней кромке ленты. Для слива осадков обычно используется приспособление сифонного типа. Процесс выливания воды следует начинать в точно установленный момент так, чтобы вода не переливалась через край ни в начале, ни в конце процесса, который не должен занимать больше 15 секунд. В некоторых приборах поплавковая камера устанавливается на рычаге весов с помощью опорных призм для того, чтобы наполненная камера перевешивала. Подъем воды облегчает процесс слива, и когда камера опорожняется, она возвращается в первоначальное положение. Некоторые плювиографы имеют механизм принудительного слива, который помогает производить процесс слива менее чем за пять секунд. У плювиографа с принудительным сливом имеется небольшая камера, отделенная от основной, в которой собираются жидкие осадки, выпадающие в момент слива. Вода из этой камеры поступает в основную камеру, когда прекращается слив, что гарантирует правильность записи общего количества жидких осадков.

Во избежание замерзания воды в поплавковой камере в зимний период, в плювиографе должен устанавливаться обогревательный прибор. Это предотвратит порчу поплавка и поплавковой камеры и даст возможность регистрировать количество жидких осадков в зимний период. Там, где есть сеть электропитания, достаточно небольшого нагревательного элемента или маломощной электрической лампочки, в противном случае можно использовать другие источники питания. В этих целях удобно использовать короткую спираль, которая наматывается на коллектор и присоединяется к батарее большой мощности. Количество подаваемого тепла не должно превышать минимума, необходимого только для того, чтобы предотвратить замерзание, так как излишнее тепло может снизить точность наблюдений, создавая вертикальное перемещение воздуха над прибором наблюдений и увеличивая потери за счет испарения.

#### 7.4.3 *Плювиограф с опрокидывающимся сосудом*

Принцип его действия очень прост. Легкий металлический контейнер (челнок), разделенный на два отделения, находится в неустойчивом равновесии относительно горизонтальной оси. В нормальном положении он опирается на один из двух ограничителей, что мешает ему окончательно перевернуться. Вода попадает из коллектора в то отделение, которое в данный момент находится выше. После того как определенное количество воды окажется в этом отделении, членок теряет устойчивость и наклоняется к другому ограничителю. Отделения контейнера (членка) имеют такую форму, что вода вытекает из того, которое находится в данный момент ниже. Тем временем осадки собираются в том отделении, которое находится выше. Движение членка в тот момент, когда он наклоняется, можно использовать для приведения в действие контактного реле, с помощью которого получают запись прерывистых линий. Расстояние между линиями соответствует времени, за которое выпадает определенное небольшое количество осадков. Если необходимо получить подробную запись, это количество осадков не должно превышать 0,2 мм. Для ряда гидрологических целей, особенно в районах с ливнями большой интенсивности и при использовании данных в системах предупреждения паводков, достаточным является количество осадков от 0,5 до 1,0 мм.

Основным преимуществом прибора такого типа является то, что он может использоваться для записей на расстоянии. Недостатки же его — следующие:

- a) для того чтобы членок наклонился, необходимо небольшое, но определенное время. Во время первой половины движения членка в то отделение, в котором находится уже вычисленное количество осадков, может попасть еще какое-то их количество. Эта погрешность может стать значительной только во время интенсивного выпадения осадков [4];
- b) при обычной конструкции членка открытая поверхность воды в соотношении с объемом довольно большая, поэтому возможны значительные потери из-за испарения, особенно в регионах с жарким климатом. Эта ошибка будет наиболее значительной во время слабого дождя;
- c) прерывистый характер записи может не дать удовлетворительных данных во время слабой мороси и очень слабого дождя. В частности, невозможно определить время начала и конца выпадения осадков.

#### 7.4.4 *Приборы для записи интенсивности дождевых осадков*

Для специальных целей был сконструирован ряд самописцев записи интенсивности осадков. Однако из-за сложности их конструкции, эти приборы не рекомендуются для широкого применения. Для многих целей удовлетворительная запись интенсивности осадков может быть получена плювиографами поплавкового и весового типа при соответствующей временной разрешающей способности.

#### 7.4.5 *Методы записи*

Независимо от того, как действует плювиограф, регистрирующий жидкие осадки, — путем поднятия поплавка, при помощи самоопорожнения контейнера или как-либо иначе — все эти движения необходимо преобразовать. Самый простой метод получения записи заключается в том, чтобы заставить бумажную ленту, разграфленную по времени, передвигаться при помощи пружинного или электронного часовочного механизма относительно пера, которое приводится в движение поплавком или системой рычагов. Существуют два основных типа бумажных лент: лента, закрепляемая на барабане, — она закрепляется (обматывается) на барабане, который должен поворачиваться только раз в день, только раз в неделю, или в течение любого другого периода времени; лента в виде рулона, которая передвигается при помощи роликов мимо стрелки с пером. Путем изменения скорости передвижения ленты регистрирующее устройство может записывать данные за период от одной недели до одного месяца и более. Масштаб времени на этой ленте может быть достаточно большим для того, чтобы легко рассчитывать интенсивность осадков.

Вместо того, чтобы записывать информацию на рулонную ленту, величины, которые подлежат записи, могут быть механически или с помощью электроники преобразованы в цифровую форму и записаны на магнитную ленту с учетом одинаковых временных интервалов, или представлены в виде ряда перфорационных отверстий на бумажной ленте для последующего автоматического считывания и обработки. Применяются также записи информации на магнитные носители и постоянные записывающие устройства.

Движение поплавка, члнока или весов можно также преобразовать в электрические сигналы и передавать по радио или по телеграфу на отдаленную принимающую станцию, где принимаются показания нескольких приборов на специальных записывающих устройствах (раздел 6.2.4).

#### 7.5 *Слой выпавшего снега*

Под слоем выпавшего снега подразумевается количество свежевыпавшего снега, осевшего на поверхность земли за определенный период времени. Измерения проводятся как в единицах высоты слоя, так и в единицах водного эквивалента.

##### 7.5.1 *Измерение высоты слоя выпавшего снега*

Прямые измерения высоты свежевыпавшего снега на открытом участке выполняются при помощи градуированной рейки или масштабной линейки. Для того чтобы получить представительное среднее значение, рекомендуется сделать достаточное количество вертикальных замеров в местах, где нет заносов. Для того чтобы не делать замеры старого снега, необходимы специальные меры предосторожности. Можно расчистить подходящий небольшой участок перед снегопадом, или покрыть поверхность старого снега куском какого-либо подходящего материала (например, деревянной

дощечкой с шероховатой поверхностью, окрашенной белой краской) и измерить высоту снега, собравшегося на нем. Измерения на наклонной поверхности (чего, по возможности, следует избегать) рекомендуется проводить, установив рейку вертикально. При имеющемся слое старого снега было бы неправильно вычислять высоту свежевыпавшего снега как разность между двумя последовательными измерениями общей высоты снега, т. к. снежный покров постоянно уплотняется и претерпевает аблацию. Там, где происходит интенсивный нанос снега ветром, для получения репрезентативной высоты снежного покрова нужно сделать много измерений.

Высоту выпавшего снега можно также измерить в неподвижном снегомерном контейнере с постоянным поперечным сечением после того, как снег в нем лег ровным слоем без уплотнения. Контейнер должен быть установлен значительно выше средней высоты снежного покрова, например не менее чем на 50 см выше максимальной наблюденной высоты снежного покрова. В месте установки не должен происходить ветровой перенос снега. Диаметр контейнера должен составлять не менее 20 см; для того чтобы из контейнера не происходило выдувания уловленного снега, он должен быть либо достаточно глубок, либо снабжен снеговой крестовиной (т. е. двумя вертикальными перегородками, расположенными под прямым углом друг к другу и разделяющими контейнер на четыре отсека).

При сильных ветрах показания обычных снегомерных контейнеров без защитных крестовин, становятся ненадежными в результате завихрений вокруг их приемных отверстий. Обычно такие контейнеры улавливают значительно меньшее количество снега, чем контейнеры с крестовинами. С другой стороны, несмотря на применение крестовин, могут возникнуть значительные погрешности в результате попадания в контейнер снега, переносимого ветром в горизонтальном направлении. Эти погрешности можно уменьшить путем установки контейнеров на высоте от трех до шести метров.

### 7.5.2 Водный эквивалент снега

Водный эквивалент свежевыпавшего снега — это эквивалентное количество жидкости, содержащееся в данном количестве свежевыпавшего снега. Его определяют одним из методов, описанных ниже, при этом важно взять несколько репрезентативных проб:

- a) взвешивание и растапливание снежных проб: при помощи снегомера можно брать цилиндрические пробы свежевыпавшего снега, а затем взвешивать или растапливать их;
- b) измерение количества снега посредством осадкомера: снег, собранный в нерегистрирующих осадкомерах, следует сразу же после каждого наблюдения растопить и измерить при помощи градуированного измерительного стакана. Для определения водного эквивалента снега, также можно использовать весовой плювиограф. В периоды снегопадов с приборов следует снимать воронки, чтобы осадки попадали непосредственно в контейнер.

7.6        **Применение радиолокаторов для наблюдений за осадками** [C33]  
 7.6.1     **Применение радиолокаторов в гидрологии**

Радиолокационные установки позволяют проводить наблюдения за местоположением и передвижением областей осадков, и с их помощью можно получать данные об интенсивности осадков в пределах действия установки [5]. При использовании радиолокатора для гидрологических целей эффективная дальность его действия составляет 40–200 км [6] в зависимости от таких характеристик радиолокатора, как излучение антенны, выходная мощность, чувствительность приемника. Гидрологической дальностью действия радиолокатора считается максимальная дальность, на которой связь между интенсивностью отраженного излучения и интенсивностью дождя остается практически обоснованной. Интенсивность дождя в любой зоне осадков в пределах гидрологической дальности может быть определена, если радиолокатор снабжен соответствующим образом тарированным регулятором усиления приемника.

Осадки ослабляют радиолокационный луч, этот эффект проявляется наиболее сильно при использовании коротковолновых радиолокационных установок. С другой стороны, длинноволновые радиолокационные установки не обнаруживают так легко слабый дождь или снег, как это делают установки, работающие на коротких волнах. Выбор подходящей длины волны зависит от климатических условий и поставленных задач. Для наблюдений за осадками применяют все три диапазона частот, приведенные в таблице 7.2.

Таблица 7.2  
Диапазон частот метеорологических радиолокаторов

Обозначение полосы частот	Частота(МГц)	Длина волны (м)
S	1 500 – 5 200	0,193 – 0,0577
C	3 900 – 6 200	0,0769 – 0,0484
X	5 200 – 10 900	0,0577 – 0,0275

7.6.2     **Уравнение радиолокации (для осадков)**

Уравнение радиолокации иногда называют МПСП по начальным буквам уравнения максимального предела свободного пространства. Это уравнение определяет наибольшую дальность действия определенной системы радиолокации. Для целей в виде осадков, когда принимается, что дождевые осадки заполнили радиолокационный луч, уравнение имеет следующий вид:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t \pi^4 A r l |K|^2 Z}{8R^2 \lambda^4}, \quad (7.4)$$

где  $\bar{P}_r$  — средняя принимаемая мощность, Вт, полученная по ряду отраженных импульсов;  $P_t$  — излучаемая пикиовая мощность, Вт;  $A_r$  —эффективная площадь антенны, м<sup>2</sup>;  $l$  — длина волны, м;  $R$  — дальность, м;  $\lambda$  — длина волны, м;  $[K]^2$  — показатель преломления дождя (0,9313 для 10 см при температуре 10 °C);  $Z$  — отражаемость, выраженная в виде  $\sum d^6 \cdot m^{-3}$ , где  $d$  — диаметр дождевых капель, мм.

Интенсивность дождя в мм·ч<sup>-1</sup> связана с медианным значением диаметров дождевых капель следующим соотношением:

$$\sum d^6 = a P_i^b, \quad (7.5)$$

где  $P_i$  — интенсивность дождя, мм·ч<sup>-1</sup>;  $a$  и  $b$  — постоянные. Было предложено много математических выражений для определения связи между распределением размеров дождевых капель у поверхности земли, скоростью падения капель разных размеров и интенсивностью дождя. Наиболее часто применяется уравнение

$$Z = 200 P_i^{1.6}. \quad (7.6)$$

### 7.6.3 *Факторы, влияющие на измерения*

#### 7.6.3.1 *Вид осадков*

Из-за того, что на эхо-сигнал влияют размеры дождевых капель, и что его мощность прямо пропорциональна шестой степени диаметра гидрометеора, следует, что от более крупных форм осадков поступают более сильные сигналы. Град, например, часто дает указания на интенсивные осадки, а снег обладает сравнительно слабой отражаемостью.

На точность полученных данных влияет также увеличение или рассеивание дождевых капель в течение промежутка времени, начиная от момента их выхода из зоны, охваченной радиолокационным лучом, и кончая моментом их соприкосновения с землей. Обычно при сильных ливнях испарение дождевых капель за время их падения до земли очень мало. Вследствие нарастания капель в нижних облачных слоях, могут значительно увеличиться их размеры и количество в зоне, расположенной ниже радиолокационного луча. Это особенно справедливо по отношению к расстояниям от радиолокационной установки свыше 130 км, при которых капли, выйдя за пределы радиолуча, могут падать через слоистообразные облака на протяжении до 1 000 м, прежде чем они достигнут поверхности земли.

#### 7.6.3.2 *Ширина радиолокационного луча*

На расстоянии 160 км ширина радиолуча может достигать нескольких километров в зависимости от параметров применяемого луча. Обычно колебания отражаемости бывают значительными в пределах этого большого пространственного объема. Таким образом, получают не единичное значение наблюдаемого элемента в точке, а значение, усредненное для большого пространственного объема. Уравнение

радиолокации основано на допущении, что радиолуч заполнен метеорологическими целями. Поэтому нельзя ожидать тесной связи между значениями осадков, полученными по радиолокационным наблюдениям и по измерениям осадкомерами в отдельных точках. Однако пространственное распределение дождя, получаемое с помощью радиолокатора, обычно более точно передает конфигурацию изогиб ливня, чем измерения большинства осадкомерных сетей.

Установлено, что для условий ливневых осадков, частота эхо-сигналов при дальности 160 км составляет всего около четырех процентов от частоты эхо-сигналов при дальности 64 км. Поэтому ливень, заполняющий весь радиолуч на расстоянии 64 км, заполнил бы только 1/8 радиолуча на расстоянии 160 км. Это является следствием сочетания факторов ширины радиолуча и его высоты.

#### 7.6.3.3 Преломление радиолокационного луча

Радиолокационные волны проходят через пространство, обладающее эффектом преломления, который обуславливает криволинейность их траектории. Средний радиус их кривизны составляет примерно 4/3 среднего радиуса Земли. Вследствие неравномерного распределения влаги по вертикали может произойти добавочное рефракционное искривление радиолуча. В результате возникает явление, которое часто называют явлением волновода или захвата радиолокационного луча; оно либо вызывает обратное искривление луча в сторону земной поверхности, либо искривляет луч вверх, причем захватываются осадки на расстоянии 80–120 км. Метеорологические условия, способствующие захвату, могут быть выражены математически.

#### 7.6.3.4 Ослабляющее влияние атмосферы

Микроволны ослабляются в атмосферных газах, облаках и осадках. Ослабление радиоволн является результатом действия двух факторов — поглощения и рассеивания. Обычно газы действуют только как поглотители, а облака и дождевые капли одновременно и рассеивают, и поглощают радиоволны. Для радиолокационных установок, работающих на более длинных волнах, ослабление не является проблемой, и им можно большей частью пренебречь. Ослабление принято выражать в децибелах.

Децибел (дБ) используется как мера относительной мощности и выражается следующим уравнением:

$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r}, \quad (7.7)$$

где  $P_t$  и  $P_r$  — соответственно излучаемая и принимаемая мощность. Величины ослабления сигнала в зависимости от интенсивности дождя и длины волны приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3

**Ослабление радиолокационного сигнала, вызванное осадками (дБ · км<sup>-1</sup>)**

Интенсивность дождя (мм·ч <sup>-1</sup> )	Длина волны (м)			0,009
	0,1	0,057	0,032	
1,0	0,0003	0,002	0,007	0,22
5,0	0,0015	0,015	0,061	1,1
10,0	0,003	0,033	0,151	2,2
50,0	0,015	0,215	1,25	11,0
100,0	0,030	0,481	3,08	22,0

**Расстояние (км), на которое должны распространяться осадки данной интенсивности, чтобы вызвать ослабление в 10 дБ при различных длинах волн**

Интенсивность дождя (мм·ч <sup>-1</sup> )	Длина волны (м)			0,009
	0,1	0,057	0,032	
1,0	33 000	4 500	1 350	45
5,0	6 600	690	164	9,1
10,0	3 300	310	66	4,5
50,0	600	47	8	0,9
100,0	300	21	3,2	0,4

#### 7.6.3.5      *Ослабление эхо-сигнала в зависимости от дальности*

Мощность принимаемого эхо-сигнала — обратно пропорциональна квадрату расстояния до цели. Поэтому очевидно, что это особая форма ослабления, которая происходит, когда радиолуч продвигается в пространстве, и эхо-сигнал ослабевает с увеличением ширины радиолуча по мере его удаления. Импульс энергии радиолокатора в радиолуче рассеивается наподобие того, как рассеиваются световые волны в луче маяка. Во многих современных системах радиолокационных установок на обзорном индикаторе применяется электрическая компенсация ослабления радиолуча в результате удаления.

#### 7.6.4      *Методы и способы регистрации*

##### 7.6.4.1      *Фотографические методы*

Для оперативных целей применяется автоматическая фотокамера с приспособлениями для быстрого проявления с целью фотосъемки экранов радиолокационных индикаторов и получения диапозитивов с многократной экспозицией. Многократные экспозиции, выполняемые через каждые 10 мин, используются для обнаружения районов с устойчивыми и (или) интенсивными осадками, выпавшими за последние один—два часа. Самые яркие места на пленке соответствуют либо

наиболее интенсивным осадкам, либо наиболее устойчивым, при которых эхо-сигнал усиливает яркость изображения при последовательных экспозициях. После быстрого проявления диапозитив монтируется на специальном держателе, и изображения эхо-сигналов проектируются на карту, на которой область их распространения можно оконтурить и сравнить с наблюденными осадками.

В идеальном случае те области эхо-сигналов, которые достаточно мощны для того, чтобы насытить одну и ту же область во время каждой экспозиции, должны создать на фотоснимках с многократной экспозицией полностью экспонированную область. Если насыщенная область не сохранится в течение всего числа экспозиций, то на фотоснимке окажется область эхо-сигналов с несколько меньшей экспозицией, которая на снимке будет казаться серого цвета.

Если радиолокатор снабжен регулятором ступенчатого усиления приемника (аттенюаторами), в фотоснимок с многократной экспозицией можно ввести параметр интенсивности. Это можно осуществить путем ступенчатого изменения чувствительности аттенюаторов по выбранным приращениям децибелов, делая снимки на уровне каждого децибела. Эта система вызывает дальнейшее усиление изображения эхо-сигнала на диапозитиве и облегчает опознавание областей с интенсивными осадками. Для ретроспективного анализа ливней делаются периодические снимки с добавочного индикатора.

#### 7.6.4.2 Ручные методы

- a) Последовательное оконтурирование: наиболее простой способ анализа заключается в последовательном нанесении местоположения эхо-сигналов на прозрачную ацетатную пленку, накладываемую на экран индикатора, на которой показаны географические границы. На основании вида эхо-сигналов можно делать заключения об интенсивности ливня в данный момент. Путем совмещения последовательно нанесенных сигналов индикатора через 15-миллиметровые интервалы можно определить площадь, охваченную ливнем, направление движения ливня, устойчивость эхо-сигналов, связь интенсивности ливня с охваченной им площадью.
- b) Оконтурирование при ступенчатом усиении: при оборудовании радиолокатора аттенюаторами в зарисовки сигналов на экране индикатора можно ввести параметр интенсивности. Для этого в течение часа следует оконтурировать через каждые 15 мин эхо-сигналы на каждом из выбранных уровней ослабления. Использование при оконтурировании различных цветов наглядно покажет наиболее мощные центры ливня, а также его пространственное распространение. Каждому уровню ослабления при данной дальности соответствует определенная сила дождя. Применяя аттенюаторы, можно определить интенсивность дождя для любого эхо-сигнала осадков в пределах дальности приема. Данные, полученные при дальности свыше 180 км, имеют ограниченное значение, так как они отличаются слабой связью с данными наземных наблюдений за осадками.

- c) Метод наложения сетки: для оценки осадков на основании радиолокационных эхо-сигналов можно применять и другие методы, например методы наложения сетки. С помощью одного из подобных методов получают информацию только о самом наличии осадков и, отчасти, об их продолжительности. При этом методе на экран индикатора через определенные промежутки времени накладывается сетка; в каждой клетке сетки, в которой наблюдается эхо-сигнал от осадков, ставится отметка. В конце избранного периода времени клетка с наибольшим числом отметок обнаружит область, в которой осадки были самыми продолжительными.

В других методах используют аттенюатор радиолокатора. Через короткие промежутки времени аттенюатор включается на выбранных интервалах ослабления. На каждом уровне ослабления и на данном удалении определяют мгновенную интенсивность осадков и отмечают ее в соответствующей клетке. Эти данные можно затем обработать и получить полную характеристику дождя.

#### 7.6.4.3 Автоматические методы

Разработана конструкция электронного радиолокационного цифрового преобразователя, способного отбирать эхо-сигналы в количестве 80 приращений дальности на каждые  $2^\circ$  азимута. Эти данные записываются на магнитную ленту в двоичной системе для немедленного анализа на месте с помощью ЭВМ, для передачи по линиям связи на ЭВМ, или для сохранения и последующего анализа. Результаты подобной обработки похожи на результаты ручной обработки, за исключением того, что количество данных больше, по крайней мере, на один порядок. Время, необходимое на выборку и запись всей радиолокационной развертки, составляет около 4 минут.

#### 7.6.5 Доплеровский радиолокатор

В предыдущих разделах данной главы были рассмотрены некогерентные (несогласованные) радиолокаторы. Это означает, что пульсация и передающая частота не являются абсолютно стабильными, хотя и достаточно устойчивыми для распознавания на приемном устройстве радиолокатора, которое в большей степени учитывает амплитуду импульсов, чем их частоту. Такие радиолокаторы позволяют определять интенсивность осадков, их относительный размер и местонахождение. Они дают возможность определить их относительное передвижение по скорости перемещения цели.

Для одновременного измерения абсолютной скорости движения дождевых капель и направления движения необходимо использовать радиолокационную установку с очень точной частотой передающего устройства и с приемной системой, чувствительной к изменению частоты в результате передвижения цели, хотя для метеорологических объектов эти изменения могут быть незначительными. Радиолокаторы подобного типа иногда называют когерентными радиолокаторами, но гораздо чаще Доплеровскими радиолокаторами благодаря тому, что они используют

широко известное явление Доплера. Более подробное описание радиолокаторов этого типа, а также дополнительные ссылки представлены в публикации ВМО *Use of Radar in Meteorology* [7] (Применение радиолокаторов в метеорологии).

Уже много лет отдельные Доплеровские радиолокаторы используются в научных целях, а в последние годы стали применяться также сети, состоящие обычно из двух или трех радиолокаторов. Они играют важную роль в исследовании атмосферы, и некоторые специалисты по радиолокационной метеорологии рассматривают их в качестве основного инструмента в изучении динамики воздушных масс, и особенно конвективной облачности. Однако до сих пор существует проблема интерпретации данных, и только в самые последние годы большое внимание было уделено их использованию в оперативных системах. В некоторых частях мира, особенно с резкими изменениями погоды, они уже задействованы в оперативных системах и считаются наиболее перспективными современными радиолокаторами. Они гораздо более сложны и дороги, чем традиционные радиолокаторы, и требуют более высокой мощности на обработку и больших усилий на его эксплуатацию. Несмотря на это, в США Доплеровские радиолокаторы будут составлять крупную национальную сеть.

Доплеровские радиолокаторы можно применять в обычных прогностических целях для получения полезной заблаговременной информации по предупреждению таких явлений, как ураганы и сильные штормы; кроме того, они позволяют получать более полную информацию об их интенсивности и структуре, чем любыми другими методами.

Наиболее пригодной является система, которая дополнительно может проводить измерения интенсивности осадков как обычным способом, так и с применением данных, полученных с помощью Доплеровского радиолокатора. Одним из важных преимуществ такой двойной системы является то, что она дает возможность определить с определенной точностью положение и размер постоянных эхо-сигналов (за счет четкости и устойчивости) с помощью канала Доплера. Эта информация затем может использоваться при получении информации об осадках без применения Доплеровского канала. Как и любая другая система дистанционного зондирования, этот метод не позволяет получать полностью успешные результаты, так как при определенных условиях погоды и прохождения радиосигналов, постоянный эхо-сигнал, повидимому, может смещаться и, наоборот, иногда осадки довольно стационарны.

Для получения эхо-сигнала от неоднородных отражающих объектов, и для измерения интенсивности осадков в наибольшем диапазоне (в сравнении с обычными радиолокаторами) или для изучения структуры сильных ливней, необходимо использование более длинных волн, предпочтительно в 10 см.

## 7.7        **Наблюдения за осадками при помощи спутников**

Осадки можно определять с помощью снимков, сделанных сканирующими устройствами или микроволновыми радиометрами. Сканирующие устройства

широко используются в оперативных целях на метеорологических спутниках. Данные, получаемые с помощью микроволновых радиометров, очень ограничены, и в настоящее время не могут использоваться для оперативных целей.

Были разработаны методы использования снимков, полученных с геостационарных спутников и спутников на полярной орбите, для оценки ежечасных, суточных и месячных величин осадков. Снимки делаются в видимой и/или инфракрасной части электромагнитного спектра, и оценка осадков основана на альбедо и/или температуре вершин облаков, а также на форме, структуре и продолжительности жизни облака. Изображения со спутников могут использоваться для оценок осадков, выпавших как на глобальной площади, так и в отдельных местах, в реальном или около реальном масштабе времени. Спутниковая информация позволяет произвести обычное измерение осадков в районах с недостаточной сетью осадкомеров, с ее помощью можно также повысить точность оценок осадков, выпавших за короткие периоды времени (несколько часов). Методы, основанные на информации со спутников, должны быть тщательно адаптированы к системам погоды, к местности и к метеорологическим условиям района. Это можно сделать с помощью проведения широкомасштабной проверки.

Для достижения наилучших результатов можно использовать комбинированные методы, при которых данные, полученные со спутников, используются вместе с радиолокационными данными или с спутниками данными об осадках. Применяют также как визуальную интерпретацию с частичной обработкой снимков, так и автоматизированную обработку спутниковой информации. В зависимости от исследуемого района и метода обработки точность определения количества выпадающих осадков находится в пределах 10–50 %.

## 7.8 Роса

Несмотря на то, что образование росы представляет собой в основном ночное явление и не может служить заметным источником увлажнения, так как количество ее относительно невелико и зависит от местности, оно имеет немаловажное значение в аридных зонах, где количество росы может быть приравнено к дождю.

Поскольку процесс образования росы в значительной степени зависит от источников влаги, следует отличать росу, образующуюся в результате конденсации атмосферного водяного пара на поверхностях с более низкой температурой (это явление известно как «выпадение росы»), и росу, которая образуется в результате испаренной влаги из почвы и растений и также конденсирующуюся на охлажденных поверхностях (так называемая «дистиллированная роса»). Обычно оба этих источника одновременно участвуют в образовании росы, хотя временами они действуют раздельно. Другим источником влаги является туман или облачные капельки, которые собираются на листьях и ветвях и падают на землю в виде капель или стекают непрерывной струей.

До последнего времени существовала заметная тенденция переоценивать среднее количество росы, выпавшей на определенной площади. Основная причина заключалась в том, что не учитывались физические пределы возможного образования росы. Изучение уравнения теплового баланса указывает на малую вероятность того, что скрытая теплота образования росы (выпавшей и/или дистиллированной) превысит радиационный баланс; в действительности, скрытая теплота должна быть меньше радиационного баланса, если принять во внимание приток тепла от почвы и за счет турбулентного обмена. Существует определенный предел образования росы на данной площади при благоприятных условиях, равный в среднем примерно  $1,1 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$ . Впрочем, образование росы может существенно усиливаться в тех местах, где распределение средних температур в горизонтальном направлении неоднородно, и где существует мелкомасштабная адвекция из относительно более теплых и влажных областей в более холодные. Кроме того, одномерная форма расчетов потока энергии должна быть модифицирована в случае применения ее к изолированным растениям, так как в этом случае структура радиационного потока и потока влаги совершенно отлична по сравнению с однородным источником. Это не означает, что данный фактор влияет на среднюю интенсивность образования росы на обширном горизонтальном пространстве, но означает только, что некоторые части этого пространства выигрывают за счет других. По многим причинам фактическая интенсивность образования росы обычно значительно ниже ее верхнего предела.

Было сделано много попыток разработать прибор для измерения увлажненности листа, имеющего искусственное покрытие, в надежде получить данные для сопоставления с естественными условиями, но они оказались не слишком успешными. Сведения о приборах, предназначенных для измерения продолжительности увлажнения листа, и оценка того, насколько показания различных приборов representative по отношению к увлажнению поверхности растений, опубликованы в приложении к публикации ВМО *The Influence of Weather Conditions on the Occurrence of Apple Scab* [8] (Влияние метеорологических условий на распространение парши у яблонь). Эти приборы могут быть использованы только в качестве подспорья в какой-то определенной ситуации или для простейших региональных сопоставлений, причем в каждом случае необходима осмотрительность. Если собирающая поверхность не находится более или менее на одном уровне с природной и не обладает аналогичными свойствами, прибор не покажет истинное количество росы, осаждающейся в естественных условиях.

Теоретическим методом теплового потока можно определить среднее количество росы, выпадающей в каком-то районе, но этот метод очень трудно применим из-за отсутствия сведений о коэффициентах переноса при строго установленвшемся режиме. Единственно известным методом измерения суммарного количества росы является тот, в котором используется чувствительный лизиметр. Однако при измерении лизиметром не учитывается дистиллированная роса, так как она не влияет на

общий вес. Единственным общепринятым средством измерения общего количества росы является использование промокательной бумаги, то есть взвешивание листков фильтрующей бумаги до того и после того, как их плотно прикладывают к поверхности, которую исследуют.

Краткий обзор методов измерения росы приводится в [1].

## 7.9 Взятие проб осадков для определения их качества

В последние годы стало очевидным, что загрязнение атмосферы превратилось в экологическую проблему огромной важности. Наиболее серьезное влияние кислотные осадки оказывают на районы Скандинавии, востока Канады и северо-востока США. Для полной картины атмосферного переноса токсичных веществ необходимо проводить отбор и анализ проб жидких и твердых осадков, а также самого воздуха.

В данном разделе рассматриваются необходимые критерии по отбору проб жидких и твердых осадков и поверхностных осаждений. Было установлено, что для анализа атмосферных осаждений за продолжительные периоды в десятки и сотни лет полезно проводить отбор проб и изучение некоторых других компонентов, например природных мхов и лишайников, которые впитывают некоторые металлы, а также кернов льда из ледников и донные отложения.

### 7.9.1 Коллекторы для отбора проб

#### 7.9.1.1 Дождевые коллекторы

Различные типы коллекторов применяются для отбора проб осадков, начиная от пластмассовых или из нержавеющей стали контейнеров и стеклянных сосудов, которые устанавливаются на местности перед началом выпадения осадков, и до специально сконструированных устройств, предназначенных для автоматического взятия проб осадков за определенные интервалы времени.

Двухведерный коллекtor является наиболее распространенным устройством, которое позволяет проводить отбор проб жидких и твердых осадков отдельно. Одно ведро используется для жидких осадков, а другое для твердых. Этот коллекtor снабжен автоматической системой защиты. В начале выпадения дождя, крышка с ведра для жидких осадков передвигается на ведро для твердых, а при их прекращении она автоматически возвращается на место и закрывает ведро для жидких осадков.

В качестве пробоотборника осадков часто применяется черный полиэтиленовый сосуд, состоящий из двух частей. В верхней части он имеет специально изготовленный съемный обод, который обеспечивает строго определенную и постоянную площадь отборника; другая часть состоит из самого ведра. Каждый раз после удаления пробы отборник должен промываться дистиллированной и ионизированной водой. При отборе проб осадков на органические загрязнители должны применяться пробоотборники из нержавеющей стали или стекла.

При необходимости получения информации о загрязняющих осадках, приносимых с разных направлений, возможно сочетание использования метеорологических приборов. Разработано специальное устройство, которое распределяет на основе флюгера выпадающие осадки в разные емкости в зависимости от направления ветра.

#### 7.9.1.2 Коллекторы для взятия проб снега

Современные пробоотборники осадков в виде снега подогреваются для растопления и сохранения собранного снега в жидком состоянии в нижней части коллектора, а в остальном их устройство аналогично дождевым.

#### 7.9.1.3 Сбор сухих осаждений

Многие из проблем, которые возникают при отборе снега, также относятся и к отбору проб твердых осадков. Разные мнения существуют в отношении надежности количественных измерений двухведерным коллектором. Турублентность воздуха вокруг таких устройств имеет иной характер, например по сравнению с турбулентностью над поверхностью озер. Вследствие этого отобранные пробы существенно отличаются по абсолютным величинам и по количеству собранных осадков разных размеров. Поэтому были предложены другие методы отбора проб твердых осадков, например использование стеклянных тарелок, покрытых липким материалом или неглубоких емкостей с этиленгликолем или с неорганическим маслом.

### Список литературы

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1990: *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений*. Пятое издание, глава 7, ВМО-№ 8, Женева.
2. World Meteorological Organization, 1982: *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 21, WMO-No. 589, Geneva.
3. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1978: *World Water Balance and Water Resources of the Earth*. Studies and Reports in Hydrology, No. 25, Paris.
4. Parsons, D. A., 1941: Calibration of a weather bureau tipping-bucket rain gauge. *Monthly Weather Review*, Vol. 69, July, p. 250, in Vol. I, Ref. 2.
5. Kessler, E. and Wilk, K. E., 1968: *Radar Measurement of Precipitation for Hydrological Purposes*. Reports on WMO/IHD Projects, Report No. 5.
6. Flanders, A. F., 1969: *Hydrological Requirements for Weather Radar Data*. Reports on WMO/IHD Projects, Report No. 9.
7. World Meteorological Organization, 1985: *Use of Radar in Meteorology* (G. A. Clift). Technical Note No. 181, WMO-No. 625, Geneva, pp. 80–86.
8. World Meteorological Organization, 1963: *The Influence of Weather Conditions on the Occurrence of Apple Scab*. Appendix — Report on instruments recording the leaf wetness period. Technical Note No. 55, WMO-No. 140, Geneva.

## ГЛАВА 8

### СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ

#### 8.1           **Общие положения**

Снег, который скапливается в водосборном бассейне, является естественным источником, формирующим основную часть запасов воды в бассейне. Прогнозирование запасов воды необходимо фермерам, скотоводам, грузоотправителям и рыбакам, а также службам, связанным с энергоснабжением, водоснабжением и регулированием паводков. Надежные прогнозы сезонного стока из водосборного бассейна в результате таяния снега возможны после нескольких лет наблюдений. Такие прогнозы основаны на корреляции между водным эквивалентом снежного покрова, измеренным по данным снегомерных маршрутов и стоком, измеренным на осадкомерных постах.

В этой главе описаны процедуры измерений снежного покрова, его высоты и запасов воды в снеге. Руководящие указания по размещению приборов, которые используются для измерения высоты снежного покрова и содержания в нем воды, представлены в разделе 7.5 настоящего *Руководства*, а вопрос планирования размещения сетей наблюдений за снежным покровом рассматривается в разделе 20.2.1.2. Дополнительные сведения по измерениям снежного покрова представлены в публикации BMO *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* [3] (Измерения снежного покрова и пространственная оценка осадков и влажности почвы).

#### 8.2           **Снегомерные маршруты**

Снегомерный маршрут — это заранее намеченная промерная линия в определенном районе, где каждый год проводятся снегомерные съемки. Снегомерные маршруты должны тщательно выбираться с тем, чтобы измерение водоносности из года в год давало надежный индекс содержания воды в снежном покрове по всему бассейну.

В горных районах выбор пригодных снегомерных маршрутов представляет собой нелегкую задачу из-за неоднородного характера местности и значительного влияния ветра. Правильно выбранные снегомаршруты в горных районах должны отвечать следующим требованиям:

- a) при измерении общей высоты сезонного покрова снегомерные маршруты должны располагаться на такой высоте над уровнем моря и быть таким образом сориентированы, чтобы таяние снега на них было незначительным или вообще отсутствовало до образования максимального снежного покрова;
- b) для того чтобы снегомерные съемки можно было проводить непрерывно, наблюдательные площадки с маршрутами должны располагаться в достаточно доступных местах;
- c) при измерениях в районах лесных массивов, где деревья препятствуют попаданию снега на землю, снегомерные маршруты должны пролегать на открытых, достаточно просторных площадках;
- d) в целях снижения до минимума эффектов ветрового дрейфа снежного покрова эти маршруты должны иметь достаточную защиту от ветра.

Критерии выбора пригодного снегомерного маршрута такие же, как и критерии для выбора места для осадкометрического поста для проведения наблюдений за выпавшим снегом.

На ровной местности снегомерный маршрут должен проходить так, чтобы средний водный эквивалент на этом маршруте максимально представлял фактический средний эквивалент снега, выпадающего в данном районе. Таким образом, желательно иметь снегомерные маршруты на различных ландшафтах, например на открытых пространствах и в лесах с разными условиями аккумуляции снега.

Когда снежный покров в данном районе однороден и равномерно распределен, то существует пространственная корреляционная зависимость толщины снега или запасов воды в снеге, и длину снегомерного маршрута или количество точек измерений на нем, необходимых для вычисления средней величины снегозапасов с заданной точностью, можно определить, основываясь на работе Д. И. Казакевича *Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии* [2].

### 8.2.1 Точки измерения

Измерение высоты снежного покрова на снегомерном маршруте в горной местности проводится путем взятия проб в точках, удаленных друг от друга от 20 до 40 м. На больших открытых пространствах, где снег сносится ветром, проб потребуется больше. Ввиду того, что в начале проведения работ сведений о тенденции ветрового дрейфа снега недостаточно, целесообразно произвести обширную снегомерную съемку по длинным промерным линиям и с большим количеством измерений. Количество измерений можно сократить после того, как будет установлена длина и ориентация снежных наносов.

На ровной местности, в зависимости от местных условий, расстояние между промерными точками для определения плотности снега должно составлять 100–500 м. Высоту снежного покрова на снегомерном маршруте рекомендуется также измерять между точками взятия проб, примерно в пяти точках, расположенных на равном расстоянии друг от друга.

Каждая промерная точка определяется измерением соответствующего расстояния от контрольной точки, указанной на карте снегомерного маршрута. В качестве меток контрольных точек могут устанавливаться рейки такой высоты, чтобы они были выше самого глубокого снега. Эти рейки смещаются от снегомерного маршрута настолько, чтобы не нарушить снежного покрова. Места для взятия проб определяются напротив каждой из контрольных точек. Контрольных точек может быть столько, сколько необходимо для того, чтобы свести до минимума количество возможных ошибок при определении места взятия пробы. Поверхность почвы должна быть очищена от камней, инея и расчищена на два метра во всех направлениях от каждой точки, где берется пробы. Рекомендуется, хотя бы на этом расстоянии, избегать водных препятствий и неровной поверхности. Если снегомерный маршрут проходит по лесистому участку, и для мест взятия проб используются небольшие прогалины, местоположение каждой точки может определяться по двум или трем помеченым деревьям.

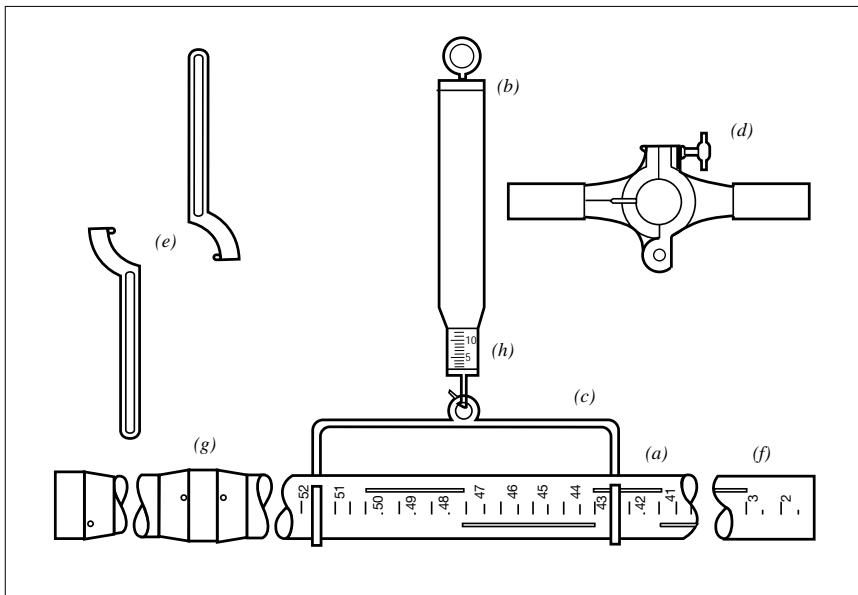
#### 8.2.2 *Снаряжение для взятия проб снега*

[C53]

В комплект снаряжения для взятия проб снега (снегомеров) обычно входят: металлический или пластмассовый цилиндр (иногда разделенный на секции для облегчения его переноски), нижний конец которого снабжен резцом, а на наружной стороне по всей длине цилиндра нанесена шкала для измерения высоты снега; пружинные или рычажные весы для определения веса взятой пробы снега; проволочная подвеска для подвешивания цилиндра во время взвешивания; набор инструментов для сборки и разборки снегомера. Типовой набор оборудования для взятия проб при глубоком снежном покрове, изображенный на рисунке ниже, можно описать следующим образом:

- a) резец: резец должен быть сконструирован таким образом, чтобы он мог проникать сквозь снег различных видов, сквозь наст и ледяные прослойки, а в некоторых случаях и сквозь слой льда довольно значительной толщины, который может образоваться близ поверхности почвы. Резец не должен уплотнять снег, чтобы внутрь него не попало излишнее количество снега. При захватывании резцом основания пробы, последнее должно настолько плотно пристать к стенкам резца, чтобы пробы не высыпалась из цилиндра при его извлечении из снежного покрова. Резцы небольшого диаметрадерживают пробу значительно лучше, чем резцы большого размера, но больший объем пробы повышает точность взвешивания.

Зубья резца должны иметь такую форму, чтобы отводить назад ледяные осколки. Резец должен быть возможно более тонким, но все же несколько выступать за внешний край цилиндра. При такой конструкции ледяные осколки отводятся в сторону после выхода из-под резца. Горизонтальная поверхность резца



Снаряжение для взятия проб снега: а) цилиндр для взятия проб снега; б) пружинные весы цилиндра; в) подвеска; г) ведущий ключ; д) гаечные ключи; е) резец; ж) винтовая муфта; з) шкала

должна иметь слабый обратный уклон для того, чтобы ледяные осколки не попадали внутрь цилиндра; необходимо следить, чтобы резец был всегда наточен и оставлял небольшой зазор между пробой снега и внутренней стенкой цилиндра. Большое число зубьев на резце создает плавный ход при вырезании пробы снега и способствует очищению резца от больших кусков льда;

- b)* цилиндр снегомера: в большинстве случаев внутренний диаметр цилиндра бывает больше внутреннего диаметра резца. Проба снега поэтому теоретически может подниматься вверх по цилиндру с минимальным трением о его стенки. При нормальном состоянии снега проба все же касается стенок цилиндра и трется о них. Поэтому стенки цилиндра должны быть гладкими для того, чтобы проба могла подниматься вверх без излишнего трения. В большинстве случаев цилиндры изготавливаются из алюминиевого сплава и анодируются. Хотя поверхность цилиндра может казаться гладкой, все же нет гарантии, что не произойдет прилипания снега, особенно при взятии проб влажного весеннего снега с крупнозернистой структурой. Натирание внутренней стороны цилиндра воском может уменьшить прилипание.

Некоторые цилиндры снабжены прорезями, через которые можно установить длину снежной колонки пробы. Вообще вследствие сжатия, особенно при взятии пробы влажного снега, длина пробы внутри цилиндра может существенно отличаться от истинной высоты снежного покрова, измеренной по шкале, нанесенной на внешней стенке цилиндра. Через прорези можно также вводить внутрь цилиндра инструмент для его чистки. Наличие прорезей создает то преимущество, что можно немедленно обнаружить ошибки вследствие закупорки цилиндра, и отбросить все явно неудачные пробы. В то же время через прорези в цилиндр может попасть лишнее количество снега и увеличить измеренный водный эквивалент снега;

- c) весы: стандартным способом измерения запаса (слоя) воды в пробе снега является взвешивание пробы, взятой цилиндром снегомера. Проба оставляется в цилиндре и взвешивается вместе с ним. Вес цилиндра известен. Взвешивание обычно производится с помощью пружинных весов или специального безмсена. Пружинные весы наиболее практичны, потому что ими легко пользоваться даже при сильном ветре. Однако точность взвешивания ими составляет около 10 г, поэтому при пользовании снегомером с малым диаметром цилиндра и при небольшой высоте снега отдельные ошибки взвешивания могут быть значительными.

Рычажные весы (безмсены) могут отличаться большей точностью, но пользоваться ими очень трудно, особенно при ветре. Сомнительно, чтобы можно было использовать большую точность этого прибора, разве только в безветренную погоду.

Другой способ измерения запаса воды в пробе снега состоит в том, что пробы ссыпаются в пластмассовые контейнеры или пакеты и отсыпаются на базовую станцию, где их можно либо точно взвесить, либо снег растопить и измерить мензуркой количество образовавшейся воды. Практически этот способ трудно осуществим, поскольку пробы должны быть ссыпаны без потерь, снабжены подробной этикеткой и отправлены на базу. Преимущество измерений в поле состоит в том, что можно легко обнаружить грубые ошибки, вызванные закупоркой цилиндра или высыпанием из цилиндра части взятой пробы, и немедленно проверить измерения. Результаты записываются в поле вместе с другими необходимыми наблюдениями, и если используется удобная записная книжка, то маловероятно, что будет допущена ошибка в определении местоположения точки измерений или условий взятия пробы.

Приступая к измерениям этого вида необходимо помнить об исключительно трудных условиях, в которых иногда приходится проводить эти измерения, и при конструировании снегомеров следует в первую очередь учитывать практические соображения.

### 8.2.3        *Процедура взятия проб*

Местоположение точек измерения определяется по расстоянию от реперных точек, отмеченных на карте снегомерного маршрута. Смещение точки измерения более чем на несколько метров, может привести к существенной ошибке.

Для взятия пробы снега цилиндр снегомера вдавливают вертикально в снежный покров, пока резец не коснется поверхности почвы. Если состояние снега позволяет, то лучше всего осуществлять равномерный нажим, для того, чтобы обеспечивать непрерывное поступление снега в цилиндр. Не прерывая равномерного вдавливания, следует несколько поворачивать цилиндр по часовой стрелке; это введет в действие резец, что необходимо для быстрой проходки тонких прослоек льда.

Когда резец цилиндра, находящегося в вертикальном положении, достигнет поверхности почвы и слегка погрузится в нее, на шкале отсчитывают деление, совпадающее с верхней поверхностью снежного покрова. Далее определяют, насколько снегомер погрузился ниже нижней поверхности снежного покрова, полученную величину вычитают из первого отсчета и разность записывают. Эта окончательная величина высоты снега имеет большое значение, так как она используется для вычисления плотности снега.

Для того чтобы избежать высыпания снега, через резец во время извлечения снегомера из снежного покрова, резцом захватывают небольшое количество почвы, служащее пробкой. Количество захваченной почвы определяется в зависимости от состояния снежного покрова. Для того чтобы удержать в цилиндре размокший снег, может потребоваться 25-миллиметровый слой плотной почвы. Следы почвенного слоя, пристынившие к нижнему концу пробы, показывают, что высыпания пробы не было.

Длина колонки захваченной пробы снега просматривается через прорези в цилиндре и отсчитывается по шкале на наружной его стороне. В отсчет вводится поправка на слой почвы и посторонние предметы, захваченные резцом. Эта поправка служит также доказательством того, что взята полная пробы снега.

Измерение в каждой точке заканчивается тщательным взвешиванием пробы снега в цилиндре снегомера. По шкале весов можно непосредственно отсчитать вес пробы снега, выраженный в сантиметрах высоты эквивалентного слоя воды. Плотность снега вычисляется путем деления водного эквивалента снега на высоту снежного покрова. Плотность снега обычно остается более или менее постоянной на протяжении всего снегомерного маршрута. Резкое отклонение от средней плотности указывает, как правило, на ошибку измерения в данной точке.

### 8.2.4        *Точность измерений*

Точность измерений толщины снега  $d_n$  или содержания воды в снеге  $w_n$  в конкретной точке снегомерного маршрута зависит от цены деления шкалы прибора и от инструментальных и субъективных ошибок.

Уменьшить ошибки измерения  $d_n$  или  $w_n$  можно, определяя среднее значение по нескольким измерениям в каждой конкретной точке. Если ошибки отдельных измерений независимы, необходимое количество измерений, которое гарантирует получение желательной относительной точности, определяется из теории ошибок следующим образом:

$$N = V_x / V_e, \quad (8.1)$$

где  $N$  — количество измерений, необходимое для получения заранее заданной точности;  $V_x$  — изменчивость ошибки измерений; и  $V_e$  — стандартная квадратическая ошибка определения среднего значения.

### 8.3 Высота и площадь снежного покрова

Измерение снежного покрова на больших пространствах и установление местных корреляций с плотностью снега дают возможность аппроксимировать водный эквивалент снежного покрова.

#### 8.3.1 Измерения с помощью снегомерных реек

Наиболее общий метод определения высоты снежного покрова, прежде всего в регионах с высоким снежным покровом, — это измерения при помощи градуированной рейки, установленной в таком месте, которое является репрезентативным для данного района и которое легко может просматриваться на расстоянии. Эта процедура приемлема в тех случаях, когда репрезентативность места не вызывает сомнений, и все, что находится непосредственно на самой площадке (приблизительно в радиусе 10 м), защищается от нежелательных вторжений. Показания снимаются в условиях ненарушенного снежного покрова.

Рейки следует окрашивать в белый цвет, чтобы свести до минимума таяние снега вокруг них. Снегомерная рейка должна иметь метровые и сантиметровые деления по всей длине.

В труднодоступных местах рейки снабжаются поперечными перекладинами так, чтобы можно было снимать показания на расстоянии при помощи биноклей, телескопов или используя авиацию.

В случае измерений высоты снежного покрова с самолета, визуальное снятие показаний может подкрепляться крупномасштабным фотографированием снегомерных реек, в результате чего данные получаются менее субъективными.

#### 8.3.2 Измерения с помощью снегомерного цилиндра

Вертикальная высота снежного покрова может также измеряться при непосредственном наблюдении с помощью градуированного снегомерного цилиндра, как правило, в ходе получения водного эквивалента снежного покрова, как это описано в разделе 8.2.3.

### 8.3.3 *Измерения при помощи фотограмметрических методов*

Аэрофотосъемка может применяться для получения данных о максимальной высоте и протяженности снежного покрова на покрытой кустарником песчаной равнине и на редколесье горных водосборов. Для этой цели аэроснимки следует получить до начала периода выпадания снега и вновь, приблизительно, во время максимальной высоты снежного покрова. Горизонтальные и вертикальные контрольные (опорные) посты для фотографирования отмечаются высокими шестами, и таким образом, одни и те же точки могут быть легко запечатлены на фотографиях снежного покрова. Высота снежного покрова определяется путем вычитания высоты снежной поверхности, установленной фотограмметрическим методом, из высоты снежной поверхности, определенной аналогичным способом по выборочным точкам. Таким образом, можно рассчитать среднюю высоту снежного покрова по данному водосбору. Точность определения снежного покрова этим методом зависит от масштаба фотографии и точности горизонтальной и вертикальной разбивки сети опорных точек. Приемлемым масштабом для аэрофотосъемки является 1 : 6 000. В случае высокого снежного покрова и благоприятных условий для фотографирования, возможна точность в пределах  $\pm 10\%$  высоты снежного покрова. Аэрофотограмметрия — довольно дорогой метод, но его принципиальное значение в том, что с его помощью получают информацию о количестве и распределении снежного покрова, которую трудно получить любым другим способом.

Высоту снеговой линии на горных склонах можно также определять при помощи фототеодолитной фотографии (наземной фотограмметрии). Теодолит периодически устанавливается в заранее выбранных пунктах для съемки снеговой линии. Наземную фотограмметрию выгодно использовать в небольших труднодоступных районах, где периодически возникает потребность в данных в зимний и весенний периоды. Точность этого метода такая же, как при аэрофотограмметрии.

Фотографии, полученные с помощью спутников при наблюдениях за облачностью, могут также быть использованы для определения общей протяженности снежного покрова как в горах, так и на равнине. Методы обработки и использования информации такого рода подробно описываются в главе 45.

### 8.4 *Измерение снежного покрова с помощью радиоактивных изотопов*

Источники радиоактивных гамма-излучений используются для различных способов измерения водного эквивалента снега. Ослабление интенсивности гамма-излучения может быть использовано для расчета запаса воды в снежном покрове между источником излучения и детектором. В одной из установок (определение водности по вертикали) измеряется общий эквивалент между двумя вертикально установленными трубками, которые расположены на определенном расстоянии над поверхностью земли.

#### 8.4.1 *Вертикальные радиоизотопные снегомеры*

Измерение плотности снега с помощью радиоактивных изотопов основано на ослаблении гамма-лучей при их прохождении через определенную среду. Такое ослабление зависит от начальной энергии лучей, плотности и толщины вещества, через которое проходят лучи. Для этого метода необходим источник высокой энергии гамма-излучения; часто используется кобальт-60 вследствие его высокой гамма-энергии и продолжительного периода полураспада (5,25 лет).

Свинцовый защитный контейнер с источником излучения помещается в почву таким образом, чтобы верхняя поверхность контейнера находилась на одном уровне с поверхностью почвы, и пучок гамма-лучей был направлен на детектор излучения, расположенный над поверхностью снежного покрова. Детектором является счетчик Гейгера—Мюллера или сцинтиляционный счетчик. Импульсы от счетчика передаются на пересчетное устройство или, в случае необходимости получения непрерывной записи, на интегрирующее и записывающее устройства.

Источник излучения может быть помещен и на некоторой глубине (50–60 см) в почве; при такой установке гамма-лучи будут проходить не только через снежный покров, но и через часть почвенного слоя. Таким образом можно в период снеготаяния получать данные о количестве воды, просочившейся в почву и стекшей по ее поверхности.

Имеется также и третий способ установки аппаратуры в полевых условиях. Детектор-счетчик излучения помещается над поверхностью почвы, а источник излучения с защитным устройством — над снежным покровом, на высоте, превышающей ожидаемую максимальную высоту снега. При таком расположении аппаратуры уменьшаются температурные колебания, и создается постоянный фон для работы счетчика.

Для установки радиоизотопных устройств требуется сравнительно дорогое и сложное оборудование. Кроме того, в любых случаях, необходимо принимать соответствующие меры предосторожности, особенно там, где приходится применять довольно сильный источник излучения. Во всяком случае, в период разработки установки необходимо проконсультироваться в учреждениях, осуществляющих контроль и выдачу разрешений, для того, чтобы избежать впоследствии различных осложнений. Несмотря на то что это ограничивает применение радиоизотопных снегомерных устройств, они являются ценным орудием изучения снежного покрова и дают возможность вести непрерывную запись наблюдений, что особенно ценно в труднодоступных районах.

#### 8.4.2 *Горизонтальные радиоизотопные снегомеры*

Во Франции и США разработаны различные модификации телеметрических радиоизотопных снегомерных устройств, снимающих профиль снега по горизонтали и по вертикали и передающих результаты измерений на основные станции по радио или

через спутники. У всех снегомерных устройств измеряющий элемент состоит из двух вертикальных труб одинаковой длины, укрепленных на расстоянии 0,5–0,7 м друг от друга. В одной трубе находится источник гамма-излучения (цезий-137 с периодом полураспада 34 года и активностью 10–30 милликюри), а во второй трубе — детектор (счетчик Гейгера—Мюллера или сцинтилляционный кристалл с фотоумножителем). В процессе измерения профиля специальный движок, работающий синхронно с детектором, передвигает радиоактивный источник вверх и вниз по трубе.

Регистрируя интенсивность горизонтального потока гамма-лучей на различных уровнях слоя снега и обрабатывая полученные данные соответствующим образом на основной станции, можно определить глубину снежного покрова, плотность снега и запас воды в нем на данной глубине, а также средние значения этих параметров. Кроме того, с помощью радиоизотопных устройств можно определить высоту слоя свежевыпавшего снега, количество жидкых осадков и интенсивность таяния снега.

Одно из таких устройств (США) снимает профиль с интервалами 1,25 см по вертикали (измерения ведутся на 5 различных уровнях). Выдержка для каждого интервала составляет 5–12 секунд. Полный цикл измерений слоя снежного покрова высотой около 4-х метров занимает приблизительно 30 минут. Снегомерные телеметрические пункты могут находиться под контролем основной станции, или могут работать автономно, используя свой собственный источник энергии, или подключаться к основному источнику питания.

В снегомерном устройстве другого типа (Франция) гамма-импульсы суммируются и посылаются в виде радиосигнала через определенный интервал времени, в течение которого детектор передвигается на 10 см по вертикали. Скорость перемещения системы в трубке автоматически регулируется так, чтобы 3 840 импульсов соответствовали вертикальному перемещению на 10 см. Окончательные данные о плотности снега или запасах воды рассчитываются по тарировочным кривым или по аналитической связи плотности снега с числом импульсов, или временем перемещения на 10 см.

## 8.5 Снегомерные подушки

Снегомерные подушки, которые бывают различного диаметра и изготавливаются из различного материала, предназначены для измерения веса снега. Подушки наиболее распространенного типа представляют собой круглые контейнеры диаметром 3,7 м, изготовленные из прорезиненного материала и наполненные незамерзающей жидкостью. Подушки укладываются на землю бровень с поверхностью почвы или покрываются тонким слоем почвы или песка. Для того чтобы предотвратить повреждение оборудования и сохранить снег в его естественных условиях, место установки снегомерной подушки рекомендуется оградить. При нормальных условиях снегомерные подушки могут использоваться в течение 10 лет и более.

Гидростатическое давление внутри подушки является мерой веса снега, лежащего на подушке. Измерение гидростатического давления осуществляется с помощью поплавкового самописца уровня или датчика давления.

Измерения с помощью снегомерной подушки отличаются от измерений с помощью стандартных снегомеров, особенно в период снеготаяния. Они особенно надежны, когда снежный покров не содержит ледяных прослоек, которые могут создать перемычку над подушкой. Измерения водного эквивалента снега с помощью снегомерных подушек могут отличаться от измерений стандартным методом взвешивания на 5–10 %.

## 8.6 Использование естественного гамма-излучения

Метод гамма-съемки снежного покрова основан на ослаблении снежным покровом гамма-излучения, испускаемого естественными радиоактивными элементами, содержащимися в верхнем слое почвы. Чем больше запас воды в снежном покрове, тем сильнее ослабляет он это излучение. Измерение гамма-излучения можно проводить либо путем наземной, либо путем самолетной съемки. Запас воды в снежном покрове можно рассчитать по соотношению интенсивности гамма-излучения, измеренной над поверхностью снежного покрова, и интенсивности, измеренной на том же маршруте до выпадения снега.

### 8.6.1 Гамма-съемка снежного покрова с самолета

Самолетная съемка дает интегральную площадную оценку водного эквивалента снежного покрова, так как по курсам полета выполняются серии точечных измерений. Этот метод рекомендуется для картографирования запасов воды в снежном покрове в равнинных районах, но он может применяться и в холмистых районах с разностями высот до 400 м. В районах, где заболоченные земли составляют более 10 %, измерения водного эквивалента снега самолетной гамма-съемкой осуществляются только на незаболоченных площадях, а полученные интегральные характеристики распространяют на всю площадь водосбора. При гамма-съемке обычная высота полета составляет 25–100 м.

Измерения представляют собой суммарные отсчеты в диапазоне больших энергий и спектральные осчеты по избранным энергетическим уровням. Информация по спектру используется для корректировки на ложную радиацию, наводимую космическими лучами, и радиоактивность атмосферы.

Точность самолетной гамма-съемки снежного покрова зависит главным образом от: качества измерительной аппаратуры (например единобразие работы измерительной аппаратуры); колебаний интенсивности космической радиации и радиоактивности приземного слоя воздуха; колебаний влажности верхнего 15-сантиметрового слоя почвы; однородности залегания снежного покрова; отсутствия продолжительных оттепелей и т. п. (например от стабильности условий полета и

ошибок в прокладывании маршрутов полетов). Предполагаемые погрешности составляют  $\pm 10\%$  с нижним пределом примерно 10 мм водного эквивалента.

Детальные эксперименты показали, что стандартное отклонение измерений водного эквивалента снега, выполненных самолетной съемкой на маршруте 10–20 км, составляет окло 8 мм и имеет случайный характер.

Для того чтобы определить водный эквивалент снега на площади  $3\,000\text{ км}^2$  с погрешностью, не превышающей 10 %, рекомендуемые длины курсов и расстояние между ними представлены в нижеследующей таблице.

**Рекомендуемые длины самолетных курсов ( $L$ )  
и расстояние между курсами ( $S$ )**

<i>Природные зоны</i>	<i>S (км)</i>	<i>L (км)</i>
Лесо-степь	40–50	25–30
Степь	40–50	15–20
Лес	60–80	30–35
Тундра	80–100	35–40

Большое преимущество гамма-съемки состоит в том, что она позволяет получить усредненные данные о снегозапасах для широкой полосы вдоль линии полета. Эффективная ширина этой полосы превышает примерно в 2–3 раза высоту полета. Достоинством гамма-съемки является также то, что интенсивность ослабления гамма-излучения в снежном покрове зависит только от массы воды и не зависит от ее состояния.

### 8.6.2 *Наземная гамма-съемка*

Ручной детектор гамма-излучения обеспечивает измерение среднего запаса воды в снежном покрове для полосы шириной около 8 м на всем протяжении снегомерного маршрута. Наземная гамма-съемка позволяет измерять воды в снежном покрове в диапазоне от 10 до 300 мм. Точность измерений колеблется от  $\pm 2$  до  $\pm 6$  мм и зависит от колебаний влажности почвы, распределения снега, а также от стабильности работы измерительной системы.

Для измерения запаса воды в снеге может применяться стационарный наземный детектор (типа счетчика Гейгера—Мюллера или сцинтилляционного кристалла с фотоумножителем), который устанавливается на снегомерном маршруте. Выпадение осадков повышает содержание радиоактивных элементов в снежном покрове, и эта дополнительная радиация измеряется в течение и непосредственно после выпадения осадков. Распад радиоактивных элементов позволяет измерять запас воды в снеге в течение примерно четырех часов после прекращения осадков. Сравнение отсчетов перед началом снегопада и после него дает информацию об изменении водного эквивалента снежного покрова.

## 8.7

**Измерение водного эквивалента снежного покрова при помощи космической радиации**

Так же, как и гамма-съемка, этот метод основан на определении отношения интенсивностей естественной космической радиации до образования снежного покрова и при наличии снега. Запас воды в снежном покрове измеряется дистанционно в нескольких репрезентативных точках на площади водосбора, а радиоактивный детектор обычно размещается на уровне земной поверхности.

С помощью прибора, разработанного в СССР [1], была проведена серия экспериментов, которые показали, что в диапазоне 10–1 000 мм водного эквивалента снега среднеквадратическая погрешность измерений составляет 34 мм.

**Список литературы**

1. Авдюшин С. И., Барабанчиков Ю. Ф., Коган Р. М., Кулагин Ю. М., Назаров И. М., Фридман Ш. Д., Юткевич И. С. Опыт определения запасов влаги в снежном покрове в горах по поглощению галактического космического излучения. — *Метеорология и Гидрология*, 1973, № 12, декабрь, с. 98–102.
2. Казакевич Д. И. *Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии*. Л., Гидрометеоиздат, 1971.
3. World Meteorological Organization, 1992: *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 35, WMO-No. 749, Geneva.



## ГЛАВА 9

### ИСПАРЕНИЕ И СУММАРНОЕ ИСПАРЕНИЕ

#### 9.1       **Общие положения**

Измерение величины испарения с поверхности воды, с почвы, а также измерение транспирации растений имеет большое значение для гидрологических исследований. Например, результаты оценок испарения могут оказаться главным аргументом при решении вопроса о целесообразности создания водохранилища в данном месте, они бывают полезны и при разработке схемы текущей эксплуатации системы водохранилищ. Испарение и эвапотранспирация являются также важными элементами для любого водобалансового исследования. Для концептуальных гидрологических моделей требуются оценки среднего суммарного испарения в бассейне.

В настоящее время пока невозможно осуществить прямые измерения испарения и эвапотранспирации с больших площадей воды и суши. Разработаны некоторые косвенные методы, которые дают приемлемые результаты. На сети станций применяются испарители и лизиметры, описанные в данной главе. Расчеты испарения с существующих водохранилищ, небольших площадей и бассейнов могут быть сделаны с помощью методов водного и энергетического балансов и аэродинамического метода. Эти методы рассматриваются в данной главе лишь с точки зрения применяемых приборов и методики наблюдений. Расчеты испарения и эвапотранспирации с обширных площадей свободной водной поверхности и суши различными косвенными методами рассматриваются подробно в главах 37 и 38 соответственно.

#### 9.2       **Водные испарители**

[C46]

Для измерения испарения с поверхности озер и водохранилищ часто пользуются данными об испарении, полученными с помощью водных испарителей. В настоящее время применяются водные испарители с различными типами испарительных сосудов: квадратными, круглыми, установленными на поверхности почвы и погруженными в нее на такую глубину, чтобы уровень воды в испарительном сосуде находился ровень с поверхностью почвы. Водные испарители устанавливаются иногда и на заякоренных плотах на озерах и других водных объектах.

Среди различных типов испарителей имеется несколько, заслуживающих особого упоминания, — это испаритель класса А, принятый в США, испаритель ГГИ-3000 и испарительный бассейн площадью  $20\text{ m}^2$ , принятые в бывшем СССР.

Испаритель класса А был рекомендован ВМО и МАГН в качестве эталонного прибора. Работа этого испарителя изучалась в разнообразных климатических условиях, в широком диапазоне географических широт и высотных зон. Испаритель ГГИ-3000 и испарительный бассейн площадью 20 м<sup>2</sup> применяются в России и ряде других стран с различными климатическими условиями. Они надежны в эксплуатации, и связь их показаний с метеорологическими элементами, обусловливающими испарение, отличается весьма высокой устойчивостью.

ВМО финансировала проведение в ряде стран сравнений [1] между испарителем класса А, испарителем ГГИ-3000 и испарительным бассейном 20 м<sup>2</sup>. Что в результате способствовало подготовке оперативных рекомендаций о возможности использования этих испарителей в разных климатических и физико-географических условиях.

Кроме испарительного сосуда, на водоиспарительных станциях часто применяются следующие приборы:

- a) интегрирующий анемометр или анемограф, установленный на высоте 1–2 м над испарительным сосудом, для определения структуры ветра над сосудом;
- b) нерегистрирующие осадкомеры;
- c) термометры или термографы для получения данных о максимальной, минимальной и наблюдающейся в данный момент температуре воды в испарительном сосуде;
- d) максимальные и минимальные термометры или термографы для измерения температуры воздуха, а там, где желательно получать данные не только о температуре, но и влажности воздуха, — гигрометр или психрометр.

Испарительные площадки должны быть достаточно ровными и свободными от всякого рода заграждений. В районах, где по почвенным и климатическим условиям не может развиваться почвенный покров, поверхность грунта на площадке следует поддерживать в таком виде, чтобы она была как можно более схожа с естественной поверхностью грунта в данном районе. Такие заграждения, как деревья, здания, кустарники и приборные будки, должны находиться от испарительной установки на расстоянии, не меньшем их четырехкратной высоты. Ни при каких обстоятельствах нельзя устанавливать испаритель или будку для приборов на бетонной плите или бетонном основании, на асфальте или подсыпке из щебня.

Приборы необходимо располагать на площадке так, чтобы они не отбрасывали тень на испарительный сосуд. Минимальный размер площадки должен быть 15 × 20 м. Площадку следует окружить оградой для защиты приборов от повреждений и для того, чтобы помешать животным пить воду из испарителя. Конструкция ограды не должна искажать структуру ветра над испарителем.

Если площадка расположена в ненаселенной местности, особенно в аридных и тропических районах, часто бывает необходимо защищать испарители от птиц и небольших животных. Способы защиты — следующие:

- a) химические репелленты; во всех случаях использования такой защиты, необходимо следить за тем, чтобы вода в испарителе не загрязнялась;
- b) проволочная сетка стандартного образца, натянутая над испарителем.

Для того чтобы оценить погрешность, возникающую в результате влияния проволочной сетки на поле ветра и термические характеристики испарительного сосуда, необходимо сравнить показания стандартного испарителя с показаниями испарителя, покрытого сеткой, установленных в сравнимых условиях.

Следует точно измерять уровень воды в испарителе до и после долива. Изменения проводятся двумя способами:

- a) уровень воды измеряется с помощью крючковой рейки, состоящей из подвижной шкалы и верньера с крючком, которые помещаются в успокоительную камеру испарителя; в устройстве другого вида используют поплавок; для долива или отлива воды в сосуде до определенной метки во время каждого наблюдения используется градуированная мензурка;
- b) уровень воды может быть измерен и таким способом:
  - i) бюретка небольшого диаметра, снабженная клапаном, ставится на реперную отметку ниже уровня воды в испарителе;
  - ii) клапан открывается, и уровни воды в бюретке и испарителе уравниваются;
  - iii) клапан закрывается, и объем воды, захваченный бюреткой, точно измеряется мензуркой;
  - iv) клапан закрывается, и объем воды, захваченный бюреткой, точно измеряется мензуркой; определяется высота уровня воды над реперной отметкой в испарителе по объему воды в бюретке и ее размерам.

Величина испарения за сутки вычисляется как разность между уровнями воды в испарительном сосуде за последовательные сутки с введением поправок на выпавшие за это время осадки. Величина испарения за время между двумя измерениями определяется по формуле

$$E = P \pm \Delta d, \quad (9.1)$$

где  $P$  — слой осадков, выпавших за время между измерениями; а  $\Delta$  — слой воды долитой (+) или отлитой (-) из испарительного сосуда.

Для наблюдений применяются также несколько типов автоматических испарителей. В этих испарителях автоматически поддерживается постоянный уровень воды в испарительном сосуде путем долива воды из запасного бака или слива ее в случае выпадения осадков. Количество добавленной или слитой воды регистрируется автоматически.

### 9.3 Почвенные испарители и лизиметры

Величина суммарного испарения (эвапотранспирация) может быть определена с помощью почвенных испарителей и лизиметров, методами водного и теплового балансов, методом турбулентной диффузии и с помощью различных эмпирических формул, основанных на использовании данных метеорологических наблюдений. Применение почвенных испарителей и лизиметров позволяет проводить прямые измерения суммарного испарения с различных поверхностей суши и испарения с почвы под сельскохозяйственными культурами. Эти приборы достаточно просты в обращении и точны, при условии, что все требования, касающиеся

их установки и методов проведения наблюдений, соблюдены. Величина транспирации растений вычисляется по разности суммарного испарения и испарения с почвы, измеренными одновременно.

В соответствии с принципами их действия почвенные испарители и лизиметры подразделяются на:

- a) весовые, использующие механические весы для определения изменений влагосодержания;
- b) гидравлические, основанные на гидростатическом принципе взвешивания;
- c) объемные, когда содержание воды поддерживается постоянным, а суммарное испарение определяется по количеству долитой или слитой воды.

Общепринятое международного стандартного прибора для измерения суммарного испарения не существует.

Общие требования, предъявляемые при выборе местоположения испарительных площадок, — следующие:

- a) место, выбранное для устройства испарительной площадки должно быть типичным для окружающей местности в отношении орошения, характеристик почвы (ее структуры и состава), уклона, растительного покрова;
- b) испарительную площадку следует располагать вне зоны влияния отдельных строений и деревьев, на расстоянии не менее 100–150 м от края сельскохозяйственного поля и не далее 3–4 км от метеорологической станции. Почвенные монолиты для испарителей и лизиметров следует брать в радиусе 50 м от испарительной площадки, а почва и растительность в монолите должны соответствовать почвенному и растительному покрову площадки.

#### 9.4 Испарение со снега

Для измерения испарения с поверхности снежного покрова или конденсации влаги в нем во многих странах применяются испарители, изготовленные из полиэтилена или прозрачной пластмассы. Поверхность снеговых испарителей должна иметь площадь не менее 200 см<sup>2</sup> и глубину 10 см.

Испаритель заполняется вырезанным из снежного покрова образцом снега, взвешивается вместе с образцом и устанавливается в снег бровень с поверхностью снежного покрова. Необходимо следить за тем, чтобы характер поверхности образца снега в испарителе был подобен поверхности снежного покрова в месте установки испарителя. В конце интервала времени, в течение которого измеряют испарение, испаритель извлекают из снежного покрова, насухо вытирают наружную поверхность и вторично взвешивают. По разности в весе между первым и вторым взвешиванием определяется величина испарения или конденсации в сантиметрах. Измерения, проведенные во время снегопада или метели, недействительны. В период снеготаяния взвешивание испарителей и

смену образцов в них следует производить чаще, поскольку в результате оседания снежного покрова, края испарителя обнажаются и изменяют структуру воздушного потока над образцом снега.

## 9.5 Косвенные методы

### 9.5.1 *Общие положения*

По причине трудностей, связанных с непосредственным измерением испарения с озер и водохранилищ, испарение обычно определяется косвенными методами, такими, как методы водного и теплового баланса и аэродинамический метод. При косвенных методах используются наблюдения за следующими метеорологическими элементами: солнечной и длинноволновой радиацией, температурой воздуха и поверхности воды, влажностью воздуха или упругостью водяного пара, ветром. Приборы и техника наблюдений для определения этих элементов описаны в нижеследующих разделах. Способы использования данных наблюдений за перечисленными элементами для расчета испарения различными косвенными методами изложены в главе 37.

### 9.5.2 *Солнечная радиация*

Фактическую, общую солнечную (коротковолновую) радиацию следует измерять неподалеку от водоема с помощью пиранометра, и необходимо вести ее непрерывную запись. Пиранометром измеряется приходящая на горизонтальную поверхность коротковолновая радиация. Самые современные пиранометры основаны на системе термоэлементов и покрыты одиночным или двойным стеклянными куполами, которые пропускают к чувствительному элементу пиранометра только радиацию с длиной волны 0,3–3 мкм. Некоторые пиранометры имеют полностью зачерненную поверхность, к которой прикреплена половина термоэлементов, а остальные установлены таким образом, что фиксируют мало меняющуюся эталонную температуру защищенного большого латунного блока. У других часть чувствительной поверхности имеет черный, а часть белый цвет, и блоки термоэлементов подсоединенны к обеим частям.

### 9.5.3 *Длинноволновая радиация*

Длинноволновая радиация измеряется косвенным путем с помощью плоских радиометров. Эти приборы не избирательны по отношению к различным длинам волн и измеряют все длины волн. Величину длинноволновой радиации вычисляют по разности суммарной радиации, излучаемой солнцем и небесным сводом и измеренной радиометром, и солнечной радиации, измеренной пиранометром в том же месте.

Один из типов длинноволнового радиометра представляет собой квадратную пластинку размером 5 см<sup>2</sup>, смонтированную горизонтально в таком положении, что ее обдает поток воздуха от небольшого вентилятора. Пластина состоит из трех слоев:

верхнего — из зачерненного алюминия, нижнего — из полированного алюминия и прослойки между ними из изоляционного материала. Вертикальный температурный градиент прибора измеряется с помощью термоэлемента. Разность потенциалов в термопаре пропорциональна проходящему через пластинку потоку тепла, который в свою очередь пропорционален энергии, получаемой зачерненной поверхностью, за вычетом излучения абсолютно черного тела. Для того чтобы ввести соответствующую поправку, температура зачерненной поверхности измеряется специальной термопарой. Вентилятор служит для устранения влияния ветра на тарировочный коэффициент прибора.

Прибором другого типа является суммарный пиррдиометр, который измеряет разницу между полной (коротковолновой и длинноволновой) приходящей (направленной вниз) и уходящей (направленной вверх) радиацией. Он состоит из горизонтально установленной пластины, обе поверхности которой зачернены. Часть блока термоэлементов подсоединенена к верхней поверхности, а остальные к нижней, и, таким образом, его напряжение на выходе пропорционально суммарной радиации с длиной волны 0,3–100 мкм. Такие устройства бывают двух типов, вентилируемые и защищенные, для снижения влияния конвективного теплопереноса на чувствительный элемент. Приборы следует устанавливать на высоте не менее 1 м над репрезентативным растительным покровом.

#### 9.5.4 *Температура воздуха*

Температуру воздуха следует измерять на высоте 2 м над поверхностью воды в центральной части водоема. На небольших водоемах температура воздуха мало меняется при движении воздушного потока над водной поверхностью, и в таких случаях измерение можно проводить на наветренном берегу.

Несмотря на то что наблюдения за температурой воздуха с интервалом в один, четыре или шесть часов дают в общем удовлетворительные результаты, все же желательно иметь непрерывную запись температуры, особенно в связи с измерениями влажности. Подходящими самописцами являются электрические термографы, в которых используются термопары с записью на многоканальном потенциометре, применяемом для измерения радиации.

При измерениях температуры воздуха необходимо затенять термометр от солнечных лучей, не нарушая естественной вентиляции. Для термометров с термопарами сконструированы специальные экраны для защиты от радиации.

Точность измерений температуры воздуха должна находиться в пределах  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ .

#### 9.5.5 *Температура поверхности воды*

Для измерения температуры воды применяются термометры различных типов:

- стеклянные ртутные и металлические ртутные термометры (в том числе: максимальные и минимальные термометры и опрокидывающиеся термометры);

- b) платиновые термометры сопротивления или на термисторных элементах с электронной схемой и со счетчиком или самописцем;
- c) термопары с вольтметром и устройством записи или без него.

Выбор термометра подходящего типа зависит от конкретного применения. Например, прямые наблюдения лучше выполнять стеклянным ртутным термометром, а непрерывную запись температуры воды можно получить с помощью термометра сопротивления или термопары с вольтметром.

Термографы, осуществляющие непрерывную запись температуры воды, обычно состоят из чувствительного элемента в металлическом корпусе, погруженного в воду, и круглого или цилиндрического записывающего устройства с трубкой Бурдона. Термографы требуют правильной установки, чтобы полученные результаты измерений были презентабельными [2].

На автоматических станциях, как правило, осуществляющих наблюдения и за другими переменными, где измерения температуры воды записываются на магнитную ленту или передаются по линиям связи на значительные расстояния, чаще всего применяются платиновые термометры сопротивления или термисторы. Эти термометры не имеют передвигающихся частей, поэтому они наиболее надежны в эксплуатации и часто более точны и чувствительны. Чувствительный элемент подключается в электрическую цепь через мост Уитстона, и электронный усилитель повышает мощность выходного сигнала до требуемой для записи или передачи на расстояние.

Обычно точность, с которой необходимо измерять температуру воды, составляет  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , за исключением измерений для специальных целей, требующих более высокой точности. Во многих случаях вполне приемлемой оказывается точность наблюдений за температурой воды  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , иногда она может приближаться к  $1^{\circ}\text{C}$ . Поэтому важно точно определить требования к точности измерения, чтобы выбрать соответствующий тип термометра.

### 9.5.6 Влажность воздуха или упругость водяного пара

Измерения влажности проводятся в том же месте, где и измерения температуры воздуха. Наиболее пригодны в качестве самописцев психрометры, в которых применены термометры с термопарами. Хорошие результаты можно получить, пользуясь термометрами с термопарами, описанными в разделе 9.5.4, с добавлением такого же термометра для измерения температуры смоченного термометра. Для смоченного термометра требуется матерчатый лоскут и психрометрический стакан, смонтированные таким образом, чтобы вода, подходящая к термометру, имела действительно температуру смоченного шарика психрометрического термометра. Смоченные термометры должны быть экранированы от радиации, и в тоже время они должны достаточно вентилироваться для того, чтобы по ним можно было получить истинную температуру смоченного термометра. При скорости ветра более  $0,5 \text{ м}\cdot\text{s}^{-1}$  экран, подобный экрану, применяемому при измерениях температуры воздуха,

обеспечивает достаточную вентиляцию. На практике экран для смоченного термометра помещают непосредственно под экраном для измерения температуры воздуха.

Если измерения температуры по сухому и смоченному термометрам проводятся с точностью до  $\pm 0,3$  °C, то при умеренных температурах точность определения относительной влажности составит  $\pm 7$  %, что вполне достаточно для расчета упругости водяного пара.

#### 9.5.7 *Ветер*

Скорость ветра следует измерять в центральной части озера или водохранилища на высоте 2 м над водной поверхностью. Обычно приборы устанавливаются на стоящем на якоре плоту.

Для определения средней суточной скорости ветра вполне пригодны анемометры любого типа, подходящие для дистанционных отсчетов или записей. Трехшарнирный вращающийся анемометр или лопастной анемометр наиболее удобны для дистанционной записи. Точность измерения трехшарнирным анемометром или лопастным анемометром составляет обычно  $\pm 0,5$  м·с<sup>-1</sup>, что считается приемлемым для измерений испарения.

Если применяется анемометр суммирующего типа, то необходимо снимать показания счетчика через фиксированные интервалы времени (желательно через сутки). Анемометр с электрическими контактами следует снабдить записывающим устройством. Для этого можно использовать электрический отметчик с записью на краях термограммы.

#### 9.5.8 *Интегрирующие устройства*

Измерения радиации и температуры воздуха обычно проводятся в одном и том же месте — либо на середине озера или водохранилища, либо на станции, на наветренном берегу. Это позволяет записывать подряд несколько элементов с помощью одного многоканального самописца. При графической записи иногда используются интегрирующие устройства. С помощью этих устройств визуально определяются средние значения каждого элемента за период, за который рассчитывается испарение (обычно за 10 дней или 2 недели).

### **Список литературы**

1. World Meteorological Organization, 1976: *The CIMO International Evaporimeter Comparisons*. WMO-No. 449, Geneva.
2. Herschy, R. W., 1971: *River Water Temperature*. Water Resources Board, TN5.

## ГЛАВА 10

### УРОВНИ ВОДЫ РЕК, ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ

#### 10.1       **Общие положения**

Данные об уровнях воды рек, озер и водохранилищ используются непосредственно для прогнозов стока, для определения границ возможного затопления во время паводков и при проектировании сооружений на водных объектах или поблизости от них. После установления связи уровней воды с расходом воды в реках или объемом воды в озерах и водохранилищах, данные об уровнях служат основой для подсчетов стока или расчетов изменения запасов воды в водоемах. Более полно эти вопросы рассмотрены в *Manual on Stream Gauging [1]* (Наставление по измерению расхода воды).

Уровнем воды называется высота поверхности воды в реке, озере или другом водном объекте по отношению к некоторой постоянной плоскости сравнения [2]. Вообще уровень должен наблюдаваться с точностью до 1 см, а при непрерывной записи уровней на гидрометрической станции — до 3 мм.

При выборе места для поста наблюдений следует руководствоваться целью проведения наблюдений и доступностью места. При выборе места на реках важным фактором являются гидравлические условия, особенно в тех случаях, когда данные об уровне воды используются для подсчетов стока. Водомерные посты на озерах и водохранилищах, как правило, располагают около истоков рек, вытекающих из них, но выше той зоны, в которой увеличение скорости вызывает понижение уровня.

#### 10.2       **Устройства для измерения уровня воды**

[C71]

##### 10.2.1      **Устройства для визуальных отсчетов уровня**

В гидрометрической практике применяются различные типы нерегистрирующих устройств для измерения уровня воды. Наиболее распространены из них следующие:

- a) вертикальная водомерная рейка;
- b) склоненная или наклоненная водомерная рейка;
- c) передаточные водомерные посты, устанавливаемые на конструкциях над водой;
- d) градуированная штанга, лента, трос или игольчатая рейка для измерения расстояния до поверхности воды.

### 10.2.2 *Самописцы уровня*

Существует много различных типов самописцев уровня воды непрерывного действия. Их можно классифицировать по принципу действия и принципу записи.

Широкое применение получила установка, состоящая из успокоительного колодца, соединенного с рекой с помощью труб; в колодце помещается поплавок, тросом или лентой соединенный с колесом записывающего устройства. В потоках с большими скоростями, во избежание понижения уровня воды в колодце, может возникнуть необходимость установки специальных неподвижно закрепленных насадок на концах подводящих трубопроводов.

Применяются также различные типы самописцев уровня, основанные на передаче давления; принцип их действия основан на том, что давление в фиксированной точке на дне потока прямо пропорционально напору воды в этой точке. В некоторых измерителях для передачи давления используется газовая система. Небольшое количество воздуха или инертного газа (например азота) впускается через трубу или трубопровод в систему. Затем давление воздуха или газа измеряется, и перо самописца приходит в движение обычно при помощи сервоманометра, серповесовой системы или при помощи преобразователя давления. Основным достоинством самописцев, основанных на измерении давления, является то, что они не требуют установки успокоительного колодца, кроме того, они не чувствительны к наносам, если их концентрация не выходит за пределы естественной.

Графические (аналоговые) самописцы могут применяться для определения уровня воды в реке. Выбор масштабов времени и записи уровня определяется амплитудой колебаний уровня, тесной связью уровня и расхода воды и стоковыми характеристиками бассейна. Графическая форма выражения данных об уровнях может быть преобразована в цифровую с помощью электрических устройств, в некоторых из них координаты  $x$  и  $y$  наносятся на перфоленты или магнитные ленты вручную.

Вместо самописцев с графической записью на ленте могут применяться самописцы с цифровой записью на перфоленте, и тогда обработка данных происходит автоматически. Один из таких самописцев представляет собой перфоратор с медленно движущейся бумажной лентой, который производит запись через заранее установленные интервалы времени в виде четырехзначной цифры. Для каждой станции интервал выбирается в зависимости от скорости, с которой уровень может измениться на величину, заметно влияющую на расход воды. На основании этого критерия на малых реках с бурными паводками интервалы должны быть более короткими, а на больших реках — более продолжительными.

Результаты измерений, полученные при помощи устройств, в которых уровень характеризуется выходным напряжением, также могут записываться на электронных логгерах (накопителях)(раздел 6.2.4) или с помощью дополнительных внешних устройств передаваться на расстояние по радиосвязи или через спутники.

## 10.3 Порядок измерения уровня воды

### 10.3.1 Нуль графика водомерного поста

Во избежание отрицательных отсчетов водомерный пост должен быть установлен таким образом, чтобы его нулевой отсчет находился ниже самого низкого ожидаемого уровня. Нуль графика поста следует ежегодно проверять путем нивелировки с использованием реперной отметки местной станции. Очень важно сохранить один и тот же нуль поста в течение всего периода наблюдений. По возможности, местные отметки нуля поста должны быть привязаны к национальной или региональной системе отсчета.

### 10.3.2 Самописцы уровня

Графические (аналоговые), цифровые, электронные или телеметрические устройства самописцев устанавливаются в соответствии с показаниями вспомогательного поплавкового уровнемера или водомерной рейки, находящихся в успокоительном колодце. Кроме того, необходимо установить водомерную рейку или передаточный уровнемер на реке, привязав их к той же отметке нуля для того, чтобы сравнивать уровень воды в успокоительном колодце и реке. Для водомерных постов, оборудованных самописцами, основанными на передаче давления и не имеющими успокоительных колодцев, водомерная рейка или передаточный уровнемер должны служить в качестве справочного устройства. Небольшие различия в высоте уровня могут быть вызваны течением у конца соединительной трубы. Значительные различия указывают на возможное засорение трубы.

### 10.3.3 Эксплуатация самописцев уровня в зимних условиях

- a) Поплавковые самописцы: этот тип самописцев требует наличия успокоительного колодца, который необходимо предохранять от покрытия льдом. Этого можно достичь, обогревая колодец электрическим или газовым обогревателем. Другими приспособлениями для предупреждения замерзания успокоительного колодца являются: временный настил внутри колодца на уровне границы промерзания грунта; и вертикальная открытая с одного конца труба такого диаметра, чтобы в ней мог поместиться поплавок, и на поверхности воды которой, находится слой масла.
- b) Гидростатический самописец уровня с сервоманометром: этот уровнемер не требует устройства успокоительного колодца, но в его механизме применены электрические батареи и в ряде случаев — ртуть. В суровых погодных условиях батареи могут сесть, а ртуть замерзает при  $-39^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, зубчатые механизмы, установленные в некоторых моделях этих самописцев, в суровых условиях работают с большими перебоями и ограничениями. Однако, предприняв соответствующие меры, например обогрев будок, самописцы этого типа можно удовлетворительно эксплуатировать в течение всей зимы.

- c) Гидростатический самописец уровня с сильфоном: уровнемеры этого типа не требуют ни успокоительного колодца, ни рабочего вещества, не подверженного замерзанию. Однако точность таких самописцев все же ниже точности самописцев других типов, описанных в этом разделе, особенно при больших колебаниях уровня.

#### 10.4 Частота измерений уровня воды

Частота наблюдений за уровнем воды определяется гидрологическим режимом водного объекта и задачами, которые ставятся при организации этих наблюдений. В случаях, когда требуются непрерывные данные наблюдений, на многих реках достаточно организовать измерения уровня два раза в сутки, дополняя их более частыми измерениями во время паводков. На реках с внезапными резкими колебаниями уровня обязательна установка самописцев. В системе прогнозов паводков в тех случаях, когда местный наблюдатель в состоянии сообщать сведения об уровнях воды в реке через короткие интервалы времени, часто используются нерегистрирующие уровнемеры. Для таких задач, как прогнозирование и регулирование паводков, могут применяться телеметрические системы, которые передают информацию при изменении уровня на заранее определенную величину.

Для решения некоторых задач достаточно регистрировать только максимальные уровни воды во время паводков; в таких случаях применяются максимальные рейки.

Для расчетов изменения запасов воды в озерах и водохранилищах обычно достаточно измерять уровни воды один раз в сутки [3].

#### Список литературы

1. World Meteorological Organization, 1980: *Manual on Stream Gauging*. Volumes I and II, Operational Hydrology Report No. 13. WMO-No. 519, Geneva.
2. International Organization for Standardization, 1988: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Vocabulary and Symbols*. Third edition, ISO 772, Geneva.
3. International Organization for Standardization, 1981: *Liquid Flow Measurement in Open Channels*. Part 1: Establishment and operation of a gauging station and Part 2: Determination of stage-discharge relation. ISO 1100, Geneva.

## ГЛАВА 11

### ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ

#### 11.1        **Общие положения**

[E70]

Расход воды представляет собой количество воды в единицах объема, протекающей через поперечное сечение потока за единицу времени. Расход воды за данный период времени может быть измерен различными методами, выбор которых зависит от превалирующих условий на данном участке русла.

#### 11.2        **Измерение расхода воды при помощи гидрометрических вертушек**

[C79, C85, C86, C88, E79]

Измерение расхода воды методом скорость—площадь пояснено примером на рисунке 11.1. Глубина потока в поперечном сечении измеряется в вертикалях градуированной штангой или лотом. Одновременно с промерами глубин проводятся измерения скорости течения вертушкой в одной или более точках по вертикали. Измерения ширины, глубины и скорости течения позволяют определить расход воды для каждой части поперечного сечения, заключенной между вертикалями. Сумма расхода всех частей поперечного сечения равна общему расходу воды [1].

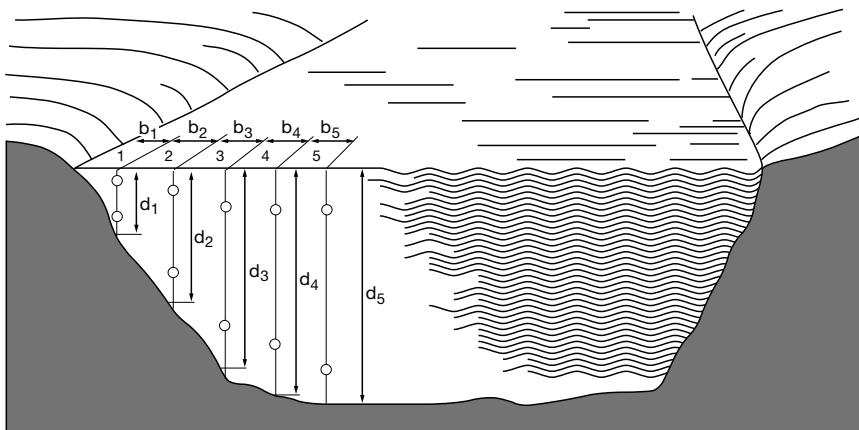


Рисунок 11.1 — Расположение точек измерений в поперечном сечении потока

### 11.2.1 *Выбор створа*

Измерение расхода воды не обязательно проводить строго в месте установки уровнемера, т. к. он одинаков возле уровнемера и на примыкающем к нему участке реки. Наибольшая точность может быть достигнута при измерении расхода воды в створах, имеющих следующие характеристики [1]:

- a) направление течения во всех точках створа должно быть параллельным и проходить под прямым углом к поперечному сечению;
- b) кривые распределения скоростей должны обладать плавными очертаниями в вертикальной и горизонтальной плоскостях;
- c) скорости течения должны быть не менее  $0,150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;
- d) русло должно быть устойчивым и иметь прямолинейные очертания;
- e) глубина потока должна быть не менее 0,300 м;
- f) русло должно быть свободно от водной растительности;
- g) условия в русле не должны благоприятствовать образованию шуги и донного льда (см. раздел 11.2.5.1).

### 11.2.2 *Измерение площади поперечного сечения*

Точность измерения расхода воды зависит от числа вертикалей, на которых проводятся измерения глубины и скорости течения. Скоростные вертикали следует размещать таким образом, чтобы наилучшим образом определить продольный профиль русла и горизонтальные вариации скорости. Как правило, расстояние между двумя смежными вертикалями не должно превышать 1/20 общей ширины потока, а расход воды, проходящей между ними, не должен превышать 10 % общего расхода.

Ширина русла и расстояние между вертикалями измеряются от постоянного начала (обычно начальная точка на берегу), которое должно находиться в створе поперечного сечения русла. Обычно расстояние между вертикалями определяется с помощью промаркированного троса, временно натянутого через реку, или по меткам, нанесенным краской на перилах моста или на гидрометрическом мостике [1]. При измерении ширины на больших реках могут применяться телеметрические системы или метод триангуляции.

Если промеры проводятся вброд на небольшой глубине, то ее можно определять с помощью градуированной штанги, которая упирается в дно реки. Если применяется механический глубомер (лебедка со счетчиком), то сначала опускают промерный груз до его соприкосновения с поверхностью воды, и в этот момент ставят указатель счетчика глубин на ноль; затем груз опускают дальше, пока он не ляжет на дно, и после этого отчитывают глубину по счетчику.

Если вес промерного груза недостаточен для того, чтобы не давать тросу отклоняться от перпендикуляра к водной поверхности, то следует угломером измерить

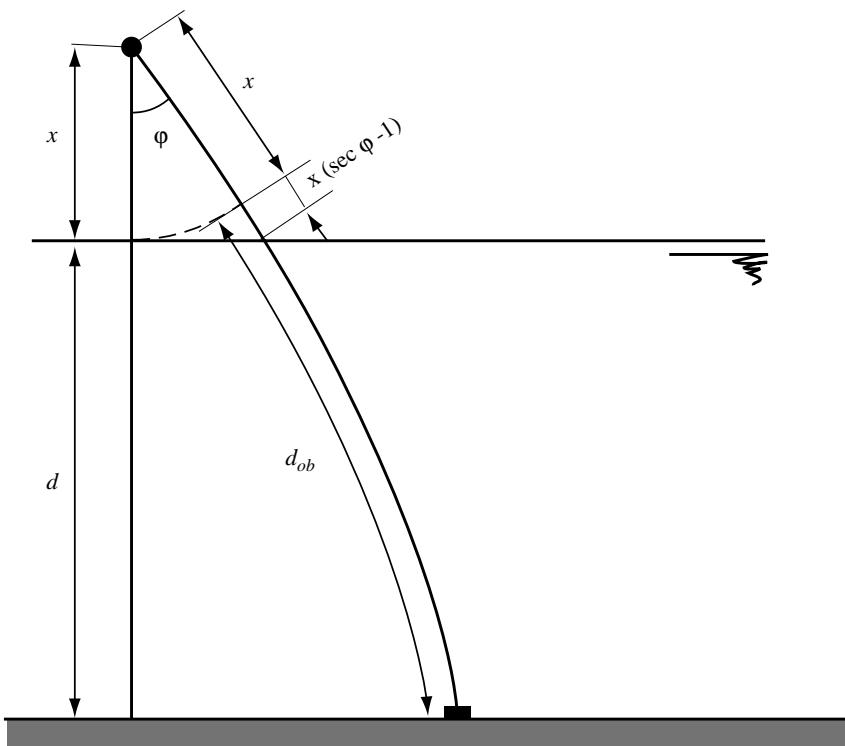


Рисунок 11.2 — Зависимость между истинной глубиной  $d$  и наблюденной  $d_{ob}$

угол отклонения. Зависимость между истинной глубиной  $d$  и наблюденной  $d_{ob}$ , в зависимости от угла отсева  $\varphi$  и расстояния от поверхности воды до точки крепления промаркированного троса  $x$ , показана на рисунке 11.2 и выражается уравнением

$$d = [d_{ob} - x(\sec \varphi - 1)]/[1 - k]. \quad (11.1)$$

Значения величины  $k$ , приведенные в таблице 11.1, основаны на допущении, что силой влечения, действующей на груз вблизи дна при сравнительно медленном течении, можно пренебречь, и что трос и груз сконструированы таким образом, что они оказывают лишь незначительное сопротивление течению воды. При таких допущениях могут возникнуть значительные погрешности только при вертикальных углах больше  $30^\circ$ .

Таблица 11.1

$\varphi$	$k$	$\varphi$	$k$	$\varphi$	$k$
4°	0,0006	14°	0,0098	24°	0,0296
6	0,0016	16	0,0128	26	0,0350
8	0,0032	18	0,0164	28	0,0408
10	0,0050	20	0,0204	30	0,0472
12	0,0072	22	0,0248		

### 11.2.3 Измерение скорости течения

[C79, E79]

#### 11.2.3.1 Вертушки для измерения скорости

Скорость течения в точке обычно определяется по числу оборотов ротора вертушки за короткий промежуток времени, измеряемый секундомером [1]. Широкое распространение получили два типа вертушек: вертушки с чашечным ротором на вертикальной оси и вертушки с лопастным винтом на горизонтальной оси. В обоих типах вертушек применяются прерыватели для создания электрического импульса, отмечающего обороты ротора [2]. С вертушками чашечного типа также применяется механический, бесконтактный счетчик для визуальных отсчетов.

Вертушки должны быть протарированы по всему диапазону скоростей, подлежащих измерению. Подробное описание методов тарировки вертушек дается в ISO 3455 [3]. Тарировка вертушек может осуществляться как индивидуально, так и для целой группы вертушек. Индивидуально оттарированные вертушки должны повторно тарироваться через 3 года или после 300 часов эксплуатации, либо когда надежность их работы вызывает сомнения (*Технический регламент*, том III, приложение 1).

### 11.2.3.2 Измерение скорости при помощи гидрометрической вертушки

Скорость измеряют в одной или нескольких точках в каждой вертикали путем отсчета числа оборотов ротора в течение промежутка времени не менее 60 секунд, и не менее 3 минут при пульсации скорости [1].

На мелких реках вертушка удерживается в требуемом положении с помощью упорной штанги, а на глубоких ее подвешивают к тросу или подвесной штанге и опускают в воду с моста, гидрометрической люльки или лодки. Если при измерениях пользуются лодкой, то вертушку надо держать в воде в таком положении, чтобы на нее не влияли образуемые лодкой возмущения потока. После того как вертушка будет установлена в избранной точке в вертикальном положении, прежде чем вести запись, ей следует дать возможность приспособиться к потоку. Если невозможно избежать отклонения потока, то измеряется угол между направлением

потока и нормалью к поперечному сечению, на который затем корректируется измеренная скорость. Если измеренный угол составляет с нормалью  $\gamma$ , то

$$V_{\text{нормаль}} = V_{\text{измеренная}} \cdot \cos \gamma. \quad (11.2)$$

Вертушку необходимо периодически вынимать из воды для осмотра. Для надежного и точного измерения очень низких скоростей могут использоваться специальные вертушки, если они испытаны в этом диапазоне скоростей.

Горизонтальная ось вертушки должна располагаться на расстоянии от поверхности воды не меньшем чем полторы высоты ротора или на расстоянии от дна русла не меньшем чем три высоты ротора.

#### 11.2.3.3 *Определение средней скорости на вертикали*

Средняя скорость воды на каждой вертикали может быть определена одним из следующих методов:

- a) метод распределения скорости;
- b) методы приведения к точкам;
- c) интегриционный метод.

Выбор соответствующего метода определяется выделенным для измерения временем, шириной и глубиной потока, условиями русла, изменчивостью уровня воды, наличием ледяного покрова, а также необходимой точностью.

#### *Метод распределения скорости*

Средняя скорость течения по этому методу определяется по скорости, измеренной в нескольких точках на каждой вертикали от поверхности воды до дна. Величина скорости, измеренная в каждой точке, должна наноситься на график, и средняя скорость на вертикали определяется делением площади эпюры скоростей на глубину. При построении эпюры может потребоваться определить скорость ниже точки последнего измерения, для этого используют предположение, что скорость на некотором расстоянии  $x$  от дна пропорциональна  $\log x$ . Строится зависимость измеренной скорости в точках, расположенных ближе ко дну русла, от  $\log x$ , которая аппроксимируется прямой линией. Построенная зависимость легко экстраполируется и используется для определения скорости в точках, расположенных близко ко дну реки.

В некоторых случаях метод распределения скорости может давать неудовлетворительные результаты при определении расхода воды, например, в случаях быстрого изменения уровня воды визуально наблюдаемое приращение уровня может быть больше, чем измеренное, за счет ошибок, возникающих из-за длительности времени, затрачиваемого на выполнение измерения.

### *Методы приведения к точкам*

- a) Метод одной точки: измерения скорости проводятся на 0,6 глубины реки от поверхности. Наблюденная скорость принимается за среднюю скорость на вертикали. Для глубин менее 1 метра принимается поправка, равная 0,92, если измерения выполнялись под ледяным покровом. Если измерения выполняются при ледовых явлениях, то вертушка должна устанавливаться на 0,5 глубины, и поправочный множитель к измеренной скорости принимается равным 0,88.
- b) Метод двух точек: измерения скорости проводятся на 0,2 и 0,8 глубины от поверхности каждой вертикали. За среднюю скорость на вертикали принимают среднее значение из двух измеренных величин.
- c) Метод трех точек: измерения скорости в каждой вертикали проводятся на 0,2, 0,6 и 0,8 глубины ниже поверхности. Среднюю скорость на вертикали определяют как среднее арифметическое из результатов трех измерений. Кроме того, измерению в точке 0,6 может придаваться больший вес, чем двум остальным, тогда средняя скорость на вертикали рассчитывается по уравнению

$$\bar{v} = 0,25 (v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8}). \quad (11.3)$$

- d) Метод пяти точек: если русло реки свободно от льда и водной растительности, то измерения скорости в каждой вертикали могут проводиться на 0,2, 0,6 и 0,8 глубины ниже поверхности и как можно ближе к поверхности и дну. Средняя скорость на вертикали определяется планиметрированием эпюры скоростей, построенной по результатам измерений, или по уравнению

$$\bar{v} = 0,1 (v_{\text{поверхность}} + 3v_{0,2} + 3v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{\text{дно}}). \quad (11.4)$$

- e) Метод шести точек: этот метод может применяться в трудных условиях, например для заросшего или покрытого льдом русла. Измерения скорости на каждой вертикали проводятся с помощью вертушки, которая опускается на 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 глубины от поверхности воды, а также, по возможности, близко к поверхности и ко дну. По наблюденным скоростям строится кривая распределения скоростей, и с помощью планиметра определяется средняя скорость на вертикали, аналогично методу распределения скоростей

$$\bar{v} = 0,1 (v_{\text{поверхность}} + 2v_{0,2} + 2v_{0,4} + 2v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{\text{дно}}). \quad (11.5)$$

Метод двух точек применяется в тех случаях, когда имеет место нормальное распределение скоростей, а глубина больше 60 сантиметров; при меньших глубинах применяют метод одной точки. Метод трех точек следует применять при измерениях под ледяным покровом, или когда русло заросло водной растительностью. Метод пяти точек применяется при очень неправильном распределении скоростей по вертикали.

Точность каждого метода следует установить, по возможности, измеряя скорость в 6–10 точках на каждой вертикали во время нескольких первых измерений расхода воды в данном створе.

### *Интеграционный метод*

По этому методу средняя скорость в вертикали определяется путем опускания и подъема вертушки по всей глубине с постоянной скоростью. Скорость опускания и подъема вертушки не должна превышать 5 % средней скорости течения в данном поперечном сечении и, в любом случае, она должна быть от 0,04 до 0,10 м·с<sup>-1</sup>. Определяется среднее число оборотов вертушки в секунду. На каждой вертикали следует выполнить два полных цикла, если результаты отличаются более чем на 10 %, то измерения повторяются. Этот метод редко применяется на реках, имеющих глубины менее 3 м и скорости течения менее 1 м·с<sup>-1</sup>.

#### 11.2.4 *Расчет расхода воды*

##### *Арифметические методы*

- a) Метод элементарных площадок: принимается, что поперечное сечение потока состоит из некоторого числа элементарных площадок, каждая из которых ограничена двумя смежными вертикалями. Если обозначить среднюю скорость течения на первой вертикали через  $\bar{v}_1$ , среднюю скорость на второй (смежной) вертикали через  $\bar{v}_2$ , полную глубину на первой и второй вертикалях соответственно через  $d_1$  и  $d_2$ , а горизонтальное расстояние между этими вертикалями через  $b$ , то выражение для расхода воды  $q$  через элементарную площадку будет иметь следующий вид:

$$q = \left( \frac{\bar{v}_1 + \bar{v}_2}{2} \right) \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right) b. \quad (11.6)$$

Полный расход получается путем суммирования расходов, проходящих через все элементарные площадки.

- b) Метод срединных площадок: расход воды через каждую площадку рассчитывается путем умножения величины  $vd$  на соответствующую ширину, измеренную вдоль линии поверхности воды. Величина  $d$ , (выражающая ширину), принимается равной полусумме расстояний до ближайших двух вертикалей. В соответствии с рисунком 11.1 полный расход  $Q$  рассчитывается следующим образом:

$$Q = \bar{v}_1 d_1 \left( \frac{b_2 + b_1}{2} \right) + \bar{v}_2 d_2 \left( \frac{b_3 + b_2}{2} \right) + \dots + \bar{v}_n d_n \left( \frac{b_n + b_{(n-1)}}{2} \right). \quad (11.7)$$

### *Графические методы*

- a) Метод интегрирования скоростей и глубин: первым этапом обработки материала этим методом является построение для каждой вертикали эпюры распределения скорости течения по глубине. Площадь эпюры представляет собой произведение средней скорости на полную глубину на вертикали. Величины этих произведений откладываются вверх от линии, изображающей поверхность воды, и по полученным таким образом точкам проводится кривая. Площадь, заключенная между этой кривой и линией поверхности воды, представляет собой расход воды в данном поперечном сечении.
- b) Метод изотах: на основании эпюр скоростей на вертикалях строится диаграмма распределения скоростей в поперечном сечении, изображающая линии равных скоростей (изотахи). С помощью планиметра измеряют площади, заключенные между изотахами и линией поверхности воды, начиная от изотахи с наибольшей скоростью. Далее строится другая диаграмма, на которой по оси ординат откладываются скорости, а по оси абсцисс — соответствующие площади. Площадь, ограниченная полученной линией связи, представляет собой величину расхода воды в данном поперечном сечении [1].

#### **11.2.5 Измерение расхода воды под ледяным покровом**

Измерение расхода воды под ледяным покровом требует знания приборов и технических приемов, описанных в разделах 11.2.1–11.2.4. В этих разделах приводится описание только того оборудования и той методики, которые специально предназначены для измерения расхода подо льдом.

##### **11.2.5.1 Выбор створа**

Рекомендуется выбирать несколько поперечных сечений в период открытого русла, когда можно легко оценить русловые условия. На некоторых гидрометрических станциях один и тот же створ может быть использован для измерений как зимой, так и летом; однако важнее проводить зимние измерения в подходящих условиях, нежели стремиться к сохранению измерений в одном створе. После того как первоначальный выбор створа сделан, следует пробить вдоль створа четыре разведочные лунки на равных расстояниях одна от другой для того, чтобы убедиться в отсутствии шуги и неравномерного распределения скорости течения. Следует, по возможности, избегать участков, на которых имеется вероятность появления шуги, потому что частицы шуги затрудняют работу вертушки и мешают определять толщину льда. Кроме того, в шуге могут наблюдаться малые скорости, которые нельзя определить обычными методами.

Зимние паводки часто приводят к прорыву воды из-под льда с образованием двух независимых потоков, из которых один течет по льду, а второй под ним. Таких участков следует избегать.

#### 11.2.5.2 *Оборудование*

- a) Пробивание лунок: при значительной толщине льда для устройства лунок желательно применять механический ледовый бур или цепную пилу. Для тонкого льда можно использовать пешню.
- b) Определение эффективной глубины: эффективная глубина воды под ледяным покровом представляет собой полную глубину за вычетом толщины погруженного льда. Эта толщина измеряется от поверхности воды в лунке до нижней кромки льда с помощью ледовой рейки, представляющей собой L-образную размеченную вешку достаточной длины. Короткое плечо L-образной рейки подводят под нижнюю поверхность льда и отсчитывают по нанесенным на рейке делениям глубину слоя воды от ее поверхности до нижней кромки льда. Если в лунке под поверхностью кристаллического льда находится шуга, то для определения глубины, на которой кончается слой шуги, опускают вертушку со свободно вращающимся ротором ниже слоя шуги. Затем вертушку медленно поднимают, пока вращение ротора не прекратится. Принимается, что в этой точке кончается чистая вода и начинается шуга.
- c) Комплект вертушки с грузом: если для устройства лунок во льду применяется ледовый бур, то для того, чтобы провести измерения в лунке, диаметр которой составляет обычно всего около 150 мм, необходимо пользоваться специальным измерительным комплектом, состоящим из вертушки и промерного груза. В комплект могут входить два каплевидных свинцовых груза, подвешенных один над вертушкой, а другой под ней, или один каплевидный груз, подвешенный под вертушкой. Если пробить лунку достаточной величины то можно использовать стандартную вертушку с грузом, в соответствии с указаниями, содержащимися в разделе 11.2.3.1.
- d) Подвешивание вертушки: вертушка может быть опущена в воду с помощью штанги, ручного промерного троса или барабана. Если полная глубина воды подо льдом выше трех или четырех метров, то обычно вертушку опускают на тросе вручную или с помощью барабана. Барабан укрепляется на выдвижной подставке (лебедке), которая устанавливается на полозьях. Для того чтобы предохранить вертушку от замерзания при переходе с одной вертикали на другую, в очень холодную погоду лебедку можно оборудовать сосудом-обогревателем с горячей водой или камерой с горячим воздухом. При небольших глубинах, когда вертушка со снятым хвостом опускается в лунку на штанге, необходимо определять положение вертушки с тем, чтобы ее правильно устанавливать по отношению к направлению течения.

#### 11.2.5.3 *Измерение расхода воды*

- a) Размещение вертикалей: указания, содержащиеся в разделе 11.2.2, пригодны также и для размещения вертикалей при наличии ледяного покрова. При выборе количества и местоположения вертикалей, изменения толщины льда и

слоя шуги по створу должны учитываться таким же образом, как и изменения глубины. Если поток воды разделяется донным льдом на несколько различных русел, то в каждом русле следует выбрать не менее трех вертикалей.

- b) Измерение скорости: для повышения точности рекомендуется вычертить эпюры скоростей по данным измерений через каждую десятую долю эффективной глубины, по крайней мере, на двух вертикалях. Таким образом можно установить, если это необходимо, переходные коэффициенты от средней скорости, определенной стандартными методами в период открытого русла, к средней скорости на вертикали под ледяным покровом. При незначительной глубине можно определять скорость лишь в одной точке, на 0,5 или 0,6 истинной глубины, но обычно при этом требуется определить коэффициент для перевода измеренной скорости в среднюю. При большей глубине (более 1 м) следует измерять скорость в следующих точках: в двух точках — на 0,2 и 0,8 эффективной глубины; в трех точках — на 0,15, 0,5 и 0,85 эффективной глубины; в шести точках — на 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 эффективной глубины у поверхности льда и у дна. Среднее из скоростей, измеренных методами двух или трех точек, можно принять в качестве средней скорости на вертикали. Измерение скорости методом шести точек описано в разделе 11.2.3.3.
- c) Общие замечания: при измерении расхода воды с ледяного покрова необходимо соблюдать соответствующие меры предосторожности. Например, при продвижении вдоль створа необходимо всегда проверить перед собой лед с помощью пешни. Если скорость течения, измеренная в условиях ледяного покрова, окажется меньше начальной скорости вертушки, то следует перенести створ на другой участок реки, где скорость течения больше. Необходимо следить за тем, чтобы ротор вертушки свободно вращался и чтобы не было помех от льда, скапливающегося около вертушки или намерзающего на ней, при перемещении от одной вертикали к другой. При проведении наблюдений следует вести подробные записи состояния погоды и ледовых условий на реке, особенно в контрольных створах. Эти записи могут оказаться полезными при расчете расхода воды за период между измерениями.

#### **11.2.5.4      *Расчет расхода воды***

Расчет расхода воды под ледяным покровом проводится по тем же правилам, что и расчет расхода воды при открытом русле, изложенным в разделе 11.2.4, с тем отличием, что вместо полной глубины используется эффективная глубина.

#### **11.2.6      *Точность измерений***

Точность измерений расхода воды зависит от надежности тарирования вертушки, условий течения воды и числа измерений глубины и скорости [4, 5]. Обычно измерения глубин и скоростей методом двух точек проводятся на 20–25 вертикалях, расположенных

по створу. При таком способе измерений вероятная ошибка при обычных условиях течения воды составляет около 5 % при доверительном уровне, равном 95 % [1].

### 11.3 Измерение расхода воды с помощью поплавков [C86]

Этот метод следует применять в тех случаях, когда невозможно пользоваться вертушкой вследствие неподходящих скоростей течения или глубин реки, либо вследствие большого количества взвешенных частиц, либо если расход должен быть измерен в течение очень короткого срока.

#### 11.3.1 Выбор створов

На прямолинейном участке русла следует выбрать три створа на таком расстоянии друг от друга, чтобы можно было точно измерить время движения поплавка от одного створа к следующему. Рекомендуется продолжительность движения поплавка равная 20 секундам, но иногда на малых реках с большими скоростями течения, на которых часто бывает невозможно найти прямолинейный участок достаточной длины, продолжительность движения поплавка может быть более короткой.

#### 11.3.2 Поплавки

Для измерения скорости течения применяются поверхностные поплавки и гидрометрические шесты. Поверхностными поплавками называются поплавки, глубина погружения которых в воду составляет меньше одной четверти глубины потока. Поверхностные поплавки следует использовать в тех случаях, когда их движение не подвергается влиянию ветра. Глубина погружения гидрометрического шеста превосходит одну четверть глубины потока. Гидрометрические шесты не должны касаться дна потока. В периоды, когда пребывание на реке становится небезопасным, можно использовать в качестве естественных поплавков плывущие деревья или льдины.

#### 11.3.3 Порядок измерений

Поплавки должны быть равномерно распределены по всей ширине реки. Обычно проводится от 15 до 35 наблюдений с помощью поплавков. При использовании естественных поплавков нужно выбрать не менее 20 плывущих предметов в различных местах по ширине реки.

Поплавки следует запускать на достаточном расстоянии от верхнего створа выше по течению для того, чтобы они могли приобрести постоянную скорость к моменту подхода к этому створу. Моменты времени, когда поплавки пересекают каждый из трех створов, засекаются по секундомеру. Этую операцию следует применять к поплавкам по всей ширине реки. Расстояние от берега до поплавков при прохождении каждого створа может быть определено с помощью соответствующих оптических приборов, например теодолита.

Глубина русла в створе может быть определена на основе топографических методов.

### 11.3.4 *Расчет скорости течения*

Скорость поплавка равняется расстоянию между створами, деленному на время добегания. Средняя скорость течения в месте прохождения поплавка равна скорости поплавка, умноженной на соответствующий переходный коэффициент, зависящий от распределения скоростей по вертикали и относительной глубины погружения поплавка. Этот коэффициент следует, по возможности, определять для каждого створа с помощью анализа результатов измерения расхода воды в этом створе, выполненных вертушкой. В случае отсутствия таких измерений, для приближенных расчетов можно использовать значения переходного коэффициента  $F$ , приведенные в таблице 11.2.

Таблица 11.2

**Значения коэффициента  $F$  для перехода от скорости поплавка к скорости течения как функции отношения глубины погружения поплавка к глубине потока  $R$**

$R$	$F$
0,10 или менее	0,86
0,25	0,88
0,50	0,90
0,75	0,94
0,95	0,98

При использовании естественных поплавков вычерчивается график их скорости в зависимости от расстояния до берега, и по этому графику определяется средняя поверхностная скорость вдоль створа. Средняя скорость течения в поперечном сечении реки равна средней поверхностной скорости, умноженной на коэффициент  $K$ , значение которого устанавливается, если это возможно, по результатам предшествующих измерений расхода вертушками, меньших по величине, чем расходы, измеренные поплавками.

### 11.3.5 *Расчет расхода воды*

Расход воды через каждую площадку поперечного сечения вычисляется путем умножения площади площадки на среднюю скорость течения через площадку. Полный расход равняется сумме расходов через все площадки [1].

### 11.4 *Измерение расхода методом смешения*

[E73]

Измерение расхода воды этим методом основано на определении степени разбавления текущей водой введенного в нее раствора какого-либо вещества — трасера. Применение этого метода рекомендуется только для таких речных створов, в которых измерение расхода воды обычными методами невозможно вследствие небольших глубин, исключительно высоких скоростей течения или большой турбулентности. Используются два основных метода смешения — это метод постоянной скорости ввода трасера и метод мгновенного ввода (ионного паводка). Общие требования (раздел 11.4.1), предъявляемые к обоим методам, аналогичны [6, 7].

#### 11.4.1 *Общие требования*

Раствор стабильного трасера вводится в поток либо с равномерной интенсивностью, либо мгновенно. Для расчета расхода воды требуется знание следующих факторов:

- a) интенсивности введения раствора при использовании метода постоянной скорости ввода или общего количества введенного раствора при методе ионного паводка;
- b) концентрации трасера (химиката) в вводимом растворе;
- c) концентрации трасера в контрольном створе потока, после того как он хорошо перемешался по бокам потока.

Точность этих методов в основном зависит от следующих условий:

- a) должно быть достигнуто полное перемешивание введенного раствора по всему поперечному сечению потока до того, как раствор достигнет контрольного створа; если раствор трасера вводится равномерно и непрерывно, то его концентрация должна быть одинаковой по всей площади контрольного сечения; если раствор трасера вводится мгновенно, то во всех точках этого сечения величина  $\int_o^T c dt$  должна быть одинаковой, где  $c$  — концентрация,  $T$  — время,

в течение которого все количество трасера проходит через заданную точку сечения. Рекомендуемое расстояние  $l$  (в метрических мерах) между местом ввода раствора и контрольным створом может быть рассчитано по уравнению

$$l = 0,13C \frac{(0,7C + 6)}{g} \frac{b^2}{\bar{d}} \text{ (метрических единиц),} \quad (11.8)$$

где  $b$  — средняя ширина водного сечения;  $\bar{d}$  — средняя глубина потока;  $C$  — коэффициент Шези для данного участка;  $g$  — ускорение силы тяжести;

- b) не должно происходить абсорбции индикатора донными отложениями, наносами, водорослями или организмами, а также разложения трасера в воде потока. Концентрацию трасера в потоке следует определять в контрольном створе и, по крайней мере, еще в одном нижерасположенном сечении потока, чтобы убедиться, что не происходит систематического изменения средней концентрации от одного створа к другому.

#### 11.4.2 *Выбор участка*

Основным критерием при выборе участка реки для измерения расхода воды методом смешения является полное перемешивание введенного раствора с речной водой на сравнительно коротком отрезке русла. Ускорению перемешивания способствует большая шероховатость русла и другие его особенности, обусловливающие высокую турбулентность потока, например: водопады, крутые извилины или неожиданные препятствия. Для необходимого смешения чем более короткое

расстояние участка выбирается, тем более значительно должно быть соотношение между глубиной и шириной потока.

#### **11.4.3 Трасеры и оборудование для их обнаружения**

Любое вещество может быть использовано в качестве трасера, если оно:

- a) обладает способностью легко растворяться в речной воде при обычных температурах;
- b) отсутствует в речной воде или встречается в ней в весьма малых количествах;
- c) не разлагается в речной воде и не абсорбируется наносами, водорослями и другими организмами;
- d) может точно измеряться простыми методами;
- e) является безвредным для человека, животных и растений в тех концентрациях, в которых оно распространяется в речном потоке.

Самым дешевым трасером является поваренная соль. При мгновенном запуске ее раствора в реку требуется сравнительно небольшое ее количество, а определение ее концентрации в воде методами электропроводности довольно несложно.

Для метода смешения широко применяется дигидрат дихромата натрия. Его растворимость в воде сравнительно высока ( $600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ), и он удовлетворяет большинству требований, изложенных в разделе 11.4.3. С помощью колориметрического анализа [7] могут быть измерены весьма незначительные концентрации этого вещества в воде.

Хлорид лития имеет растворимость в воде  $600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Пламенный фотометрический анализ может обнаружить концентрации лития менее  $10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Для измерения расхода методом смешения применяются: иодид натрия, нитрит натрия и тетрагидрат сульфата марганца.

В США для метода смешения широко используется родамин WT. Его абсорбционные характеристики намного лучше, чем характеристики других родаминовых красок. Концентрация краски измеряется на участке с помощью флуориметров, которые могут определять концентрации 5–10 частей на миллиард ( $5\text{--}10$  на  $10^9$ ).

Для метода смешения применялись такие радиоактивные элементы, как бром-82, золото-198, иод-131 и натрий-24. С помощью счетчика с датчиком, опущенным в воду или стандартную измерительную камеру, можно достаточно точно измерить концентрацию этих элементов, равную всего  $10^{-9}$  степени. Хотя радиоактивные элементы являются идеальными трасерами, в некоторых районах их применение для измерения расхода воды в реках может оказаться ограниченным из-за создаваемой ими угрозы здоровью людей.

#### **11.4.4 Расчет расхода воды**

Уравнения, используемые для вычисления расхода воды  $Q$ , основаны на принципе неразрывности потока трасера:

$$Q = \frac{Q_{tr} c_i}{c_s} \quad (\text{при непрерывном введении раствора}) \quad (11.9)$$

и

$$Q = \frac{c_i V}{\int_0^{\infty} c_s dt} \quad (\text{при мгновенном введении раствора}), \quad (11.10)$$

где  $Q_{tr}$  — интенсивность ввода трасера;  $c_i$  — концентрация вводимого раствора;  $c_s$  — концентрация трасера в речной воде в контрольном створе;  $V$  — объем введенного раствора;  $t$  — время.

### 11.5 Определение расчетного уровня воды

[E71]

При измерении расхода воды необходимо фиксировать уровень воды и время его измерения через такие интервалы, которые позволили бы привязать измеренные расходы к соответствующим уровням воды. Обычно в качестве расчетного уровня измеренного расхода можно принять уровень, относящийся к середине промежутка времени, в течение которого измерялся данный расход. Однако, если уровень изменялся во времени не по линейному закону, то следует рассчитать средневзвешенный уровень за время измерения расхода с помощью следующего уравнения:

$$\bar{h} = \frac{Q_1 h_1 + Q_2 h_2 + \dots + Q_N h_N}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N}, \quad (11.11)$$

где  $\bar{h}$  — средневзвешенный расчетный уровень;  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  — измеренные расходы воды, соответствующие уровням  $h_1, h_2, \dots, h_N$ .

### 11.6 Расчет расхода воды косвенными методами

[E70]

#### 11.6.1 Общие положения

Во время паводков часто бывает невозможно прямо измерить расход воды вследствие чрезмерно быстрого его изменения, больших скоростей течения, ширины и глубины потока, большого количества мусора и обломочного материала; иногда во время паводков дороги становятся непроходимыми, а гидрометрические сооружения недоступными. При таких условиях максимальный расход паводка может быть определен после спада паводка с помощью расчетов, в которых совместно используются хорошо известные положения гидравлики и данные полевых наблюдений за состоянием русла и за метками высоких вод. Все косвенные методы требуют совместного решения уравнений неразрывности и энергии.

Такие расчеты можно делать применительно к отдельным участкам речного русла, водопропускным трубам под дорожными насыпями и отверстиям мостов, гребнями плотин и дамб. Хотя расчетные формулы гидравлики различны для разных типов водотоков, во всех методах учитываются следующие факторы:

- a) геометрические и физические характеристики русла и граничные условия изучаемого участка;
- b) отметки уровня воды во время пика паводка для определения верхней границы площадей поперечного сечения и разности в высотах двух значащих точек;
- c) гидравлические факторы, основанные на физических характеристиках, например коэффициент шероховатости.

### **11.6.2        *Полевое обследование***

Для выбора наиболее подходящего участка для определения расхода воды при помощи одного из косвенных методов проводится предварительное обследование района по картам, с воздуха или путем выезда на место. Участок должен находиться как можно ближе к интересующему гидрометрическому створу, и между ними не должно быть крупных притоков или водозаборов. На участке должны иметься отчетливые метки высоких вод для того, чтобы можно было установить профиль поверхности воды во время паводка.

Детальная инструментальная съемка проводится для определения: геометрии русла на выбранном и прилегающем участках; поперечного сечения русла; деталей и размеров водопропускных труб, мостов, плотин, дамб, дорог и других искусственных сооружений, а также местоположения и расположения меток высоких вод, оставленных паводком. Отмечаются все факторы, влияющие на шероховатость русла, и определяются коэффициенты шероховатости. Для облегчения камеральной оценки выбранного участка, необходимо сфотографировать поперечные профили и участки русла.

На основании полевых исследований составляются чертежи, показывающие план и профили русла, уровни высоких вод, площади поперечного сечения, детали различных искусственных сооружений. Учитываются гидравлические факторы и вычисляется расход воды.

### **11.6.3        *Определение расхода воды по уклону и площади поперечного сечения***

При определении расхода воды по уклону и площади поперечного сечения выбирается участок речного русла с правильными очертаниями или с однообразными изменениями гидравлических свойств [8]. Расход рассчитывается на основании уравнения установившегося движения потока, например уравнения Маннинга, учитывающего характеристики русла, профили водной поверхности и коэффициент шероховатости.

### **11.6.4        *Измерение расхода воды в трубах***

Максимальный расход воды через трубы может быть установлен по меткам высоких вод, определяющим уровень воды в верхнем и нижнем бьефах, по данным о геометрии труб и их уклонах и по поперечным сечениям, определяющим условия подхода потока к трубе. Зависимости между расходом воды в трубах и напором

устанавливаются на основании лабораторных исследований, которые проверяются в полевых условиях. Максимальный расход определяется на основании применения уравнений неразрывности и энергии для подходного поперечного сечения и сечения внутри трубы. Для удобства расчетов были выделены шесть типов истечения через трубы в зависимости от местоположения измерительного сечения и относительного превышения уровня в верхнем и нижнем бьефах.

#### 11.6.5 *Измерение расхода воды в местах сжатия потока*

Сужение речного русла в местах мостовых переходов создает резкий перепад уровня воды между поперечным сечением, расположенным на подходном участке и суженным сечением под мостом. Суженное сечение, ограниченное устоями моста и дном реки, является до некоторой степени расходомером, который может быть использован для расчетов паводочных расходов. Напор в суженном сечении определяют по меткам высоких вод (выше или ниже по течению), а геометрию русла и мостового перехода устанавливают путем полевого обследования. Уравнение расхода воды выводится на основании записи уравнений энергии и неразрывности для участка между двумя упомянутыми сечениями.

#### 11.6.6 *Измерение расхода воды на плотинах и дамбах*

Плотина, дамба или насыпь обычно образуют контрольное регулирующее сечение, расход в котором зависит от уровня воды на выше расположенным участке. Максимальный расход в контрольном сечении может быть определен на основе полевого обследования меток высоких вод и геометрических характеристик сооружения. Методы определения разрабатываются в результате полевых и лабораторных исследований расходных характеристик водоотливов, плотин и дамб.

Полевые исследования состоят в установлении разности уровней в верхнем и нижнем бьефе по меткам высоких вод, в обследовании подходного поперечного сечения для установления скорости потока на подходе к сооружению и в точном определении профиля сооружения для того, чтобы определить соответствующий коэффициент расхода. В настоящее время имеется информация о коэффициентах для следующих водоотливов:

- a) тонкостенных водоотливов со свободно падающей струей и затопленных;
- b) водоотливов с широким порогом, незатопленных;
- c) плотин практического профиля, затопленных и незатопленных;
- d) плотин неправильного профиля.

#### 11.7 *Измерение расхода воды в трудных условиях*

Общие вопросы проблемы измерения расхода воды в сложных условиях рассмотрены в публикации BMO *Level and Discharge Measurements under Difficult Conditions* [9] (Измерения уровня и расхода воды в сложных условиях).

### 11.7.1 *Неустойчивое русло*

Для нестабильного русла характерны систематические перемещения, значительные деформации ложа, высокое содержание наносов и присутствие различного обломочного материала в потоке. Для того чтобы избежать русловых деформаций, которые являются помехой в работе на постоянно оборудованном створе, желательно выбирать его на достаточно однородном и прямом участке реки, удаленном от различных сооружений (мостов и др.). Наиболее устойчивые берега располагаются вдоль мест сужения русла. На малых реках участок должен быть удобным для оборудования постоянного измерительного створа. На малых реках, в которых нет переноса больших камней и обломков, предпочтительней проводить измерения стока при помощи гидрометрических лотков.

В некоторых случаях на малых реках оборудуется искусственное русло для измерений расхода, которое улучшает кривую связи уровней с расходами. В зависимости от специфических условий участка оно может иметь форму водослива с широким порогом или лотка. Сооружение не должно вызывать нежелательных нарушений течения, должно иметь достаточную высоту, чтобы не испытывать влияния переменного подпора от нижерасположенного участка. В маловодные периоды измерительный створ должен обеспечивать хорошую связь между уровнем и расходом. На больших гидрометрических сооружениях предусматриваются пешеходные мостики, с которых осуществляется очистка русла и измерения расхода вертушкой. На реках с неустойчивым руслом рекомендуется использовать вертушку в изолированной камере из-за высокого содержания взвешенных наносов. Промерные рейки должны иметь специальное приспособление, удерживающее их от погружения в ил.

При измерении расхода воды методом скорость—площадь глубина обычно определяется перед началом и после окончания измерений скорости. В потоках с большими скоростями течений различные обломки могут приводить к существенным повреждениям вертушек, поэтому желательно сравнивать показания вертушек до и после выполнения измерений с показаниями стандартной вертушки, неиспользуемой в измерениях.

В реках с интенсивно смещающимися руслами распределение скоростей в поперечном сечении периодически меняется. Поэтому выбор местоположения скоростных вертикалей следует делать с учетом распределения скоростей на момент измерения данного расхода. Использование же постоянных вертикалей может приводить к систематическим погрешностям. На реках с интенсивным смещением русел предпочтение следует отдавать методу приведения к точкам, по возможности сокращая число вертикалей [1].

Если промеры глубины выполнялись дважды (до начала и после окончания измерения скоростей), то площадь поперечного сечения рассчитывается на основании средних значений глубин, полученных по двум измерениям. На больших

реках, особенно если местоположение промерных вертикалей определялось по береговым знакам, вертикали двух промеров могут не совпадать. В этом случае площадь поперечного сечения потока для расчета расхода определяется по значениям глубин, снятых с усредненного профиля.

### 11.7.2 *Горные реки*

Основной особенностью горных рек является высокая скорость течения. Горные реки часто мелкие, с шероховатыми руслами, могут преграждаться валунами и обломками, иметь поперечный уклон, неровную водную поверхность и могут нести камни и гальку. При выборе створа для измерений необходимо, по возможности, избегать всех вышеперечисленных явлений.

На небольших горных реках при очень большой турбулентности потока желательно проводить измерение расхода одним из вариантов метода смешения (раздел 11.4). На качестве измерений очень эффективно оказывается искусственное улучшение русла. Желательно также измерительный створ оборудовать гидрометрическим мостиком (раздел 11.2).

При измерении расхода воды вертушкой должны использоваться, по крайней мере, 20 вертикалей. Измерение глубины штангой на горных реках практически не приводит к систематическим погрешностям, но применение лота с хвостовым оперением может приводить к погрешностям, не поддающимся оценке, особенно при малых глубинах. Для глубин до 1 м при измерении штангой погрешности измерения составляют 2,5–3 %, для глубин 0,4–0,8 м погрешности измерения могут увеличиваться до 10–15 %.

Измерение скорости вертушкой рекомендуется проводить методом двух точек. Способ расчета расхода воды описан в разделе 11.2.4.

### 11.7.3 *Измерение расхода при неустановившемся движении воды*

#### 11.7.3.1 *Измерение расхода во время паводков*

Измерения паводочных расходов на больших реках рекомендуется проводить с мостов, канатных переправ или с лодки. Имеются различные переносные электромеханические лебедки, которые могут устанавливаться на грузовые автомобили, моторные лодки и трактора. На больших реках, где нет мостов и канатных переправ, используются суда или паромы. Для того чтобы определять местоположение судна в створе измерения, на борту судна или на берегу устанавливается телеметрическое оборудование. На паромах, использующих кабель для разметки гидрометрического створа, могут устанавливаться электрические или механические двигатели для натягивания кабеля и для подъема и опускания оборудования. Для измерения глубины, как правило, требуются лоты весом до 200 кг, так как на больших реках максимальные скорости достигают  $6\text{--}8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . Для измерения глубины можно также использовать эхолот.

При измерении паводочных расходов на малых реках наиболее предпочтительны системы дистанционного управления процессом измерения. Они могут быть разборными и использоваться в разных местах, в которых для установки оборудования нужно только натянуть трос через реку. При отсутствии таких систем можно использовать легкие переносные дюралевые или резиновые лодки (не плоскодонные) с подвесным мотором и платформой для оборудования. В труднодоступные районы лучше добираться на вертолете.

При очень больших скоростях для измерения скорости могут использоваться поверхностные поплавки или стробоскопические инструменты. Стробоскоп имеет несколько вращающихся зеркал и телескоп, который направлен на поверхность воды. Скорость вращения зеркал подбирается таким образом, чтобы получить устойчивое изображение водной поверхности. Скорость потока определяется по скорости вращения зеркал. Этим методом могут измеряться скорости до  $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , но предельная величина зависит еще от высоты точки наблюдения над поверхностью воды. Следует отметить, что измерения скорости стробоскопом могут также проводиться в очень мутном потоке с плавающим льдом и другими твердыми включениями, не позволяющими использовать вертушку. Коэффициент перехода от поверхностной скорости к средней скорости на вертикали, определенный такими же измерениями в менее трудных условиях, обычно равен 0,85–0,90. Измерения глубины обычно проводятся эхолотом, или используют стандартный профиль поперечного сечения.

На широких реках можно использовать метод движущегося судна (раздел 11.8.2). Он особенно удобен при прерывистом ледоходе или если река транспортирует различные обломки в период паводков. Если же лед или обломки сосредоточиваются в какой-либо части потока, то в этой части измерения осуществляются поплавковым методом, а для остального потока измерения проводятся с помощью вертушки.

На широких руслах (от 3 до 20 км) с несколькими рукавами измерения скорости вертушкой чрезвычайно затруднены. В этом случае лучше всего использовать метод аэрофотосъемки с использованием поплавков.

#### 11.7.3.2 *Измерение расхода на участках с приливно-отливными явлениями*

Если участок подвержен влиянию морских приливов, то необходимо учитывать следующее:

- a) постоянное изменение уровня воды с изменением или без изменения направления течения;
- b) непрерывное изменение скорости во времени со значительными градиентами даже на одной и той же глубине;
- c) изменение распределения скоростей во времени;
- d) изменение направления течения в цикле прилив—отлив с переходом скорости через нулевое значение;

- e) наличие слоистых потоков с различной плотностью и направлением течения в разных слоях;
- f) существенное изменение ширины и поперечного сечения потока;
- g) наличие крупномасштабной турбулентности (т. е. колебаний с периодом более 30 секунд и амплитудой изменения скоростей до 50 %) и сейш.

Расход на участках рек с приливно-отливными явлениями обычно определяется одним из следующих методов[10]: методом скорость—площадь, объемным методом или решением уравнения неустановившегося движения потока. Расход на приливно-отливном участке может измеряться методом движущегося судна (раздел 11.8.2), особенно в периоды, когда эпюра скоростей близка к своему обычному виду. Могут также оказаться приемлемыми другие методы, например ультразвуковой (раздел 11.8.3).

При измерении расхода методом скорость—площадь, скорость измеряется в течение всего цикла прилива—отлива. Для того чтобы учесть различные направления течения, измерения обычно проводятся в нескольких точках на каждой вертикали. Одновременно с измерением скорости осуществляется непрерывное измерение уровня воды и глубины на вертикалях. Затем все измерения приводятся к моменту времени, на который вычисляется расход.

Точность метода скорость—площадь повышается, если:

- a) приливно-отливный цикл, во время которого проводятся измерения, является периодическим или почти периодическим;
- b) течения, особенно в течение максимального прилива, параллельны друг другу и имеют во всех точках одинаковые углы к створу измерения;
- c) кривые распределения скоростей по горизонтали и по вертикали имеют правильную форму на измерительном участке;
- d) поперечный профиль створа однороден и не имеет отмелей.

Поэтому выбранный для измерения участок должен, по возможности, отвечать следующим требованиям:

- a) поперечное сечение речного русла должно быть плавающим и правильной формы;
- b) глубина воды в створе должна быть достаточной для эффективного использования вертушки;
- c) поперечное сечение русла должно быть устойчивым в течение цикла прилива—отлива;
- d) расход должен проходить по одному или нескольким руслам, поперечное сечение которых можно определить с приемлемой точностью;

- e) створ не должен находиться вблизи искусственного или естественного препятствий, искажающих структуру потока;
- f) измерительный створ должен быть очищен от растительности;
- g) следует избегать обратных течений, косых потоков и мертвых зон.

Створ должен быть размечен по обоим берегам хорошо различимыми знаками.

Для определения расхода в период подъема и спада волны прилива проводятся измерения в течение всего цикла прилива—отлива. Для того чтобы точно определить момент нулевой скорости, измерения начинают и заканчивают на полчаса раньше начала и позже окончания цикла прилива. В зависимости от имеющегося оборудования и характеристик выбранного створа для измерений скорости могут применяться различные методы:

- a) при наличии достаточного количества плавсредств измерения могут проводиться одновременно на всех вертикалях в течение полного цикла прилива—отлива;
- b) при ограниченном количестве плавсредств выбранные скоростные вертикали размечаются якорными буями. На одном или двух суднах выполняются измерения последовательными переходами от одной вертикали к другой, причем интервалы времени между измерениями на каждой вертикали не должны превышать 1 час. Кроме того, требуется еще одна дополнительная лодка, с которой проводятся непрерывные измерения в течение полного цикла на эталонной вертикали. В этом случае кривая изменения скоростей, происходящих в течение полного цикла, на каждой вертикали строится на основании измерений в точках и данных, полученных для эталонной вертикали;
- c) если волна прилива—отлива меняется незначительно день ото дня, и если имеются по крайней мере два судна, то может приниматься следующий порядок измерения. С одного судна, установленного постоянно, проводятся измерения на эталонной вертикали каждый день в течение полного цикла прилива—отлива. Со второго судна выполняются измерения в течение полного цикла на одной вертикали, после чего на другой день оно перемещается к следующей вертикали для выполнения измерений в течение полного цикла и т. д. В этом случае число дней, необходимых для выполнения всех измерений, равно числу скоростных вертикалей;
- d) если приливы имеют различные амплитуды, и нет возможности провести измерения на многих вертикалях, то измерения выполняются в течение месяца в одной вертикали за полный цикл при различных амплитудах и на подъемах и спадах приливов;
- e) при значительной пульсации измерения должны проводиться на каждой вертикали с помощью нескольких вертушек, установленных на разных глубинах, в течение 10–15 минут. Средняя скорость определяется за средний период времени измерения;

- f) в случае косых течений следует применять вертушку с записью направления или с приспособлениями для измерения угла отклонения.

Если происходит быстрое изменение скорости, то значения скорости в различных точках на вертикали должны выверяться на определенное время. С этой целью проводятся повторные измерения скорости или во всех точках вертикали, в направлении от дна к поверхности, или только в точке у поверхности.

Для вычисления расхода в каждой вертикали строится кривая изменений скорости во времени, с которой снимаются значения скорости на определенный момент времени.

Для расчета расхода объемным методом проводятся синхронные измерения уровня воды на границах измерительного участка, или участков, и заблаговременно определяются их геометрические характеристики (поперечное сечение, длина, площади затоплений). Кроме того, выше по реке, за пределами зоны влияния приливов, оборудуется дополнительный пост, по которому можно определить фактический расход воды в реке. Если в широком эстуарии имеются поперечные уклоны, то уровни воды измеряются на обоих берегах. Приращение объема приливной призмы за расчетный интервал времени вычисляется по изменению средних глубин и площадей водной поверхности на граничных участках. Для того чтобы рассчитать средний расход, общее приращение объема нужно разделить на расчетный период времени и вычесть приток речных вод.

При использовании метода расчета расхода по уравнению неустановившегося движения, делаются определенные допущения при решении уравнения для рассматриваемого поперечного сечения, например, на параллельность линий течения, на одинаковую плотность, на призматичность русла. Измерения обычно проводятся при двух типах приливного цикла (высоком и низком). Результаты вычислений используются также для корректировки параметров уравнений.

#### 11.7.4 *Водная растительность в руслах рек*

Водная растительность в реках может быть источником сравнительно больших погрешностей. На малых реках желательно сооружать искусственное контрольное сечение. Если это невозможно по каким-либо причинам, то расходы следует определять методом скорость—площадь. При этом участок длиной от 6 до 10 м в зоне гидрометрического створа поддерживается полностью очищенным от водной растительности в течение всего вегетационного периода. Кроме того, на несколько большем участке по берегам удаляются кустарник и высокая трава.

Применение токсических веществ, предотвращающих рост водных растений, является эффективным только на короткий период времени. Поэтому наиболее практичным способом остается периодическая очистка участка русла. Растения, вырастающие в русле реки, срезаются специальной машиной или с помощью обычной косы.

Скорость течения на каждой вертикали измеряется в трех точках (0,15, 0,5, и 0,85 глубины). Если глубина вертикали меньше 0,40 м, то скорость измеряется методом одной точки.

При описании условий измерения расхода можно дать краткую характеристику состояния водной растительности.

Поскольку водоросли могут наматываться на винт вертушки, то в процессе измерения ее следует довольно часто осматривать и очищать. Если измерения проводятся методом одной точки, то следует тщательно контролировать регулярность поступления сигналов. Недавно был проведен эксперимент по применению электромагнитного метода для гидрометрических работ в условиях зарастания русла (см. раздел 11.8.4).

## 11.8        **Нетрадиционные методы измерения расхода воды**

### 11.8.1      ***Общие положения***

Определение расхода методом скорость—площадь (главы 11 и 12), методом смещения (раздел 11.4) и средствами гидравлического сооружения (глава 12) имеют определенные ограничения и во многих случаях неприменимы. Ниже дается описание трех новых методов измерения стока в открытых руслах, а именно: метод движущегося судна; ультразвуковой и электромагнитный метод.

#### 11.8.2      ***Метод движущегося судна***

[E79]

При этом методе на судно устанавливается специально спроектированный комплексный блок вертушек, которые показывают величину скорости на данный момент времени. Измерение проводится при пересечении потока на заранее выбранном участке, перпендикулярно течению. Во время безостановочного движения судна эхолотом измеряются геометрические размеры поперечного сечения русла, а непрерывно работающая вертушка измеряет совместную скорость потока и перемещения судна. По данным измерений в 30–40 точках (вертикалях) вычисляется расход. Скорость, измеренная в каждой точке поперечного сечения, представляет собой вектор относительной скорости течения воды, проходящей через блок вертушек. В этом блоке имеется флюгер, укрепленный на стальном стержне, на верхнем конце которого установлен угломерный круг с указателем, определяющим угол между направлением флюгера и действительным курсом судна. По этим данным и береговым маркерам тщательно размещенного створа определяется линия поперечного сечения. Для расчета расхода берутся средние данные измерений, полученные примерно по шести пересечениям потока в противоположных направлениях [11, 12].

Расход воды рассчитывается обычным способом, принятым в методе скорость—площадь, — суммированием произведений площадей сегментов на средние скорости. Поскольку вертушка устанавливается обычно примерно на 1 м ниже поверхности воды, то необходим коэффициент для корректировки измеренной

скорости. На больших реках этот коэффициент примерно одинаков для всего по-перечного сечения и, как показали проведенные исследования, равен 0,90–0,92.

Метод измерения расхода с помощью движущегося судна дает единичное измерение расхода с точностью  $\pm 5\%$  при доверительном уровне, равном 95 %.

#### 11.8.3 Ультразвуковой (акустический) метод

[C73]

Принцип ультразвукового метода состоит в том, чтобы проводить измерения скорости течения на определенной глубине в русле путем одновременной передачи импульсов в обоих направлениях через слой воды от датчиков, размещенных на берегах по обе стороны реки. Датчики, посылающие и принимающие звуковой сигнал, размещаются на противоположных берегах таким образом, чтобы угол между направлениями звукового импульса и потока составлял от 30 до 60°. Разница между временем прохождения импульсов через поток в верхнем направлении и между временем прохождения импульсов в нижнем направлении связана непосредственно со средней скоростью воды на глубине датчиков. Этую скорость можно связать со средней скоростью потока в поперечном сечении в целом. Система может выдавать прямой расчет расхода воды путем введения фактора площади в электронный процессор.

В идеальных условиях датчики устанавливаются на такой глубине, при которой они измеряют среднюю скорость потока. Поскольку на практике датчики фиксируются в определенном положении и при любом изменении уровня их положение относительно точки измерения средней скорости потока может меняться, то измеренную скорость необходимо корректировать.

В настоящее время существуют два типа систем ультразвукового измерения скорости. В первом типе систем датчики устанавливаются постоянно в определенном положении и тарируются с помощью вертушки. Во втором — датчики могут перемещаться или вертикально, или наклонно с помощью специального устройства. В последнем случае система имеет самоблокировку и не требует изменений вертушкой. Перемещая датчики вертикально (от 7 до 10 точек), проводят измерения скорости на нескольких уровнях. По каждой системе отсчетов строится эпюра вертикального распределения скоростей в возможно большем диапазоне уровней. Это позволяет определить, во-первых, наиболее подходящее положение для фиксирования датчиков, и, во-вторых, установить кривую связи уровней и коэффициентов расхода, как в первом методе.

На реках с небольшим диапазоном изменения уровня можно применять однодорожечную ультразвуковую систему. На реках с большими колебаниями уровней необходима система с несколькими парами ультразвуковых датчиков.

Точность ультразвукового метода зависит от точности, с которой измеряется время прохождения звукового импульса. Некоторые из имеющихся в настоящее время способов позволяют осуществлять эти измерения с очень высокой точностью [13–21].

### 11.8.4 Электромагнитный метод

Движение воды, текущей в реке, пересекает вертикальную составляющую магнитного поля Земли, в результате чего в воде возникает электродвигущая сила (ЭДС), которая может измеряться с помощью двух электродов. ЭДС прямо пропорциональна средней скорости в реке, в каждой элементарной поперечной струе воды в момент пересечения вертикальных магнитных линий Земли.

На рисунке 11.3 схематично изображена электромагнитная гидрометрическая станция, у которой катушка размещается в ложе русла, магнитное поле имеет  $x$  направление, ЭДС направлена по оси  $y$ , движение проводника, т. е. речного потока, совпадает с осью  $z$ . Закон электромагнитной индукции Фарадея связывает длину движущегося в магнитном поле проводника с генерируемой ЭДС через уравнение [22].

Однако на практике большинство речных русел обладает значительной электропроводностью, которая будет передавать электрический ток от потока к руслу. Кроме того, наведенное поле будет пространственно ограничено и электрический ток, выходящий с площади этого поля, будет иметь эффект уменьшения выходного потенциала. Оба названных фактора уменьшают сигнал, а следовательно и выходное напряжение, пропорциональное средней скорости речной воды. Поэтому на электромагнитной гидрометрической станции необходимо измерять проводимость и воды, и русла.

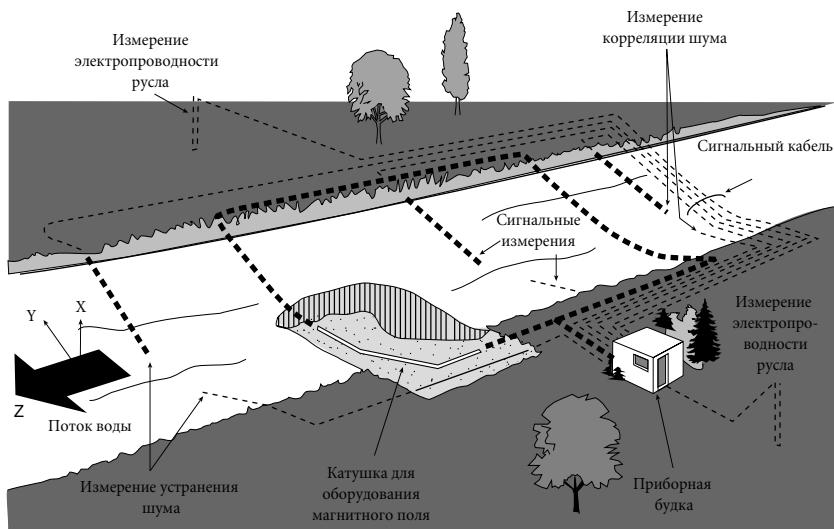


Рисунок 11.3 — Электромагнитный метод: схема основной системы

Наиболее приемлемо подавать на катушку постоянный ток, направление которого меняется несколько раз в секунду, но может использоваться и переменный ток с частотой в 1 герц. Типовая установка может иметь катушку из 12 витков двойного изолированного кабеля диаметром 16 мм<sup>2</sup>, с силой тока в 25 ампер и напряжением 20 вольт [22].

Электромагнитный метод будет находить широкое применение на реках с водной растительностью, с высоким содержанием наносов или с неустойчивым руслом. Он дает непрерывную запись средней скорости в поперечном сечении, которая, вместе с данными об уровнях воды, необходима для вычисления расхода.

Точность метода зависит от используемого прибора для обнаружения и измерения малых напряжений. В настоящее время можно регистрировать сигнал в 100 нановольт ( $10^{-9}$  вольт), который соответствует скорости воды примерно в 1 мм·с<sup>-1</sup>. Для электромагнитной станции необходима тарировка участка с помощью вертушки или другими методами и определение связи между расходом и измеряемыми величинами (выходным напряжением).

### Список литературы

1. International Organization for Standardization, 1979: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Velocity-area Methods*. Second edition, ISO 748, Geneva.
2. International Organization for Standardization, 1988: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Rotating Element Current-meters*, Second edition ISO 2537, Geneva.
3. International Organization for Standardization, 1976: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Calibration of Rotating-element Current-meters in Straight Open Tanks*. ISO 3455, Geneva.
4. International Organization for Standardization, 1985: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Velocity-area Methods — Collection and Processing of Data for Determination of Errors in Measurement*. Second edition, ISO 1088, Geneva.
5. International Organization for Standardization, 1981: *Liquid Flow Measurement in Open Channels*. Part 1: Establishment and operation of a gauging station and Part 2: Determination of the stage-discharge relation. ISO 1100, Geneva.
6. International Organization for Standardization, 1973: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Dilution Methods for Measurement of Steady Flow*. Part 1: Constant rate injection method. ISO 555, Geneva.
7. International Organization for Standardization, 1987: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Dilution Methods for Measurement of Steady Flow*. Part 2: Integration method. ISO 555, Geneva.
8. International Organization for Standardization, 1973: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Slope-area Method*. ISO 1070, Geneva.
9. World Meteorological Organization, 1986: *Level and Discharge Measurements under Difficult Conditions* (f. A. Tilrem). Operational Hydrology Report No. 24, WMO-No. 650, Geneva.
10. International Organization for Standardization, 1974: *Measurement of Flow in Tidal Channels*. ISO 2425, Geneva.

11. International Organization for Standardization, 1979: *Measurement of Liquid Flow in Open Channels: Moving-boat Method*. ISO 4369, Geneva.
12. Smoot, G. F. and Novak, C. E., 1969: *Measurement of Discharge by the Moving-boat Method*. Book 3, Chapter All. U.S. Geological Survey Techniques, Water Resources Investigations.
13. Herschy, R. W. and Loosemore, W. R., 1974: The ultrasonic method of river flow measurement. *Symposium on River Gauging by Ultrasonic and Electromagnetic Methods*, 16–18 December 1974, Water Research Centre, Department of Environment, Water Data Unit, University of Reading, U.K.
14. Smith, W., 1969: Feasibility study of the use of the acoustic velocity meter for measurement of net outflow from the Sacramento-San Joaquin Delta in California. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1877*, Reston, Virginia.
15. Smith, W., 1971: Application of an acoustic streamflow measuring system on the Columbia river at The Dalles, Oregon. *Water Resources Bulletin*, Vol. 7, No. 1.
16. Smith, W., 1974: Experience in the United States of America with acoustic flowmeters. Water Research Centre and Department of the Environment. *Water Data Unit Symposium*, University of Reading, U.K.
17. Botma, H. C. and Klein, R. E., 1974: Some notes on the research and application of gauging by electromagnetic and ultrasonic methods in The Netherlands. *Symposium on River Gauging by Ultrasonic and Electromagnetic Methods*, 16–18 December 1974, Water Research Centre, and Department of Environment, Water Data Unit, University of Reading, U.K.
18. Kinoshita, T., 1970: Ultrasonic measurement of discharge in rivers. *Proceedings of the International Symposium on Hydrometry*, 13–19 September 1990, Koblenz, Germany, UNESCO/WMO/IAHS Publication No. 99, pp. 388–399.
19. Holmes, H., Whirlow, D. K. and Wright, L. G., 1970: The LE (Leading Edge) flowmeter: a unique device for open channel discharge measurement. *Proceedings of the International Symposium on Hydrometry*, 13–19 September 1990, Koblenz, Germany, UNESCO/WMO/ IAHS Publication No.99, pp. 432-443.
20. Halliday, R. A., Archer, W. M. and Campbell, P. I., 1975: The Niagara river acoustic streamflow measurement system. *Technical Bulletin No. 86*, Environment Canada, Inland Waters Directorate, Ottawa.
21. Lenormand, J., 1974: Débitmètre à ultrasons mdl 2 compte rendu d'essais: Ponts et chaussées, Service des voies navigables du Nord et du Pas-de-Calais, Service hydrologique centralisateur, Lambersart, France.
22. Herschy, R. W. and Newman, J. D., 1974: The electromagnetic method of river flow measurement. *Symposium on River Gauging by Ultrasonic and Electromagnetic Methods*, 16–18 December 1974, Water Research Centre, Department of Environment, Water Data Unit, University of Reading, U.K.

## ГЛАВА 12

### ГИДРОМЕТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

#### 12.1        **Назначение гидрометрических станций**

Основной целью гидрометрических станций является предоставление систематических данных об уровне и расходе воды. Данные о речном стоке необходимы для проектирования систем водообеспечения, проектирования гидротехнических сооружений, при эксплуатации систем управления водными ресурсами, а также при расчете наносов и расхода, включая загрязняющие вещества.

Поскольку без применения какого-либо из новых методов, описанных в разделах 11.8.3 и 11.8.4, проводить непрерывные измерения расхода воды невозможно, данные о расходе вычисляются по зависимости между уровнем и расходом, полученной на основе периодических измерений расхода (глава 11) и по систематическим наблюдениям за уровнем воды (глава 10), или по измеренной структуре потока, оттариrowанной в лабораторных или полевых условиях.

#### 12.2        **Выбор участка**

Выбор рек для измерений расхода воды должен быть обусловлен принципами проектирования сети (глава 20) и предполагаемым использованием данных о стоке. При выборе участка для устройства гидрометрической станции на данной реке следует руководствоваться следующими критериями, которым отвечает идеальный гидрометрический створ:

- a) общее направление потока прямолинейно не менее чем на 100 м вверх и вниз от гидрометрического створа;
- b) весь поток воды проходит по одному руслу при всех уровнях, нет бокового отвода воды вблизи створа и подповерхностного потока;
- c) русло реки не подвержено размыву и отложению наносов и свободно от водной растительности;
- d) берега реки устойчивы, достаточно высоки для пропуска паводков и очищены от кустарника и деревьев;
- e) имеется устойчивое естественное контрольное сечение в виде выхода коренной породы или другой устойчивый быстроток для измерения низких расходов и сжатие русла для высоких расходов, или незатопляемые при всех уровнях

водопады или пороги, по которым может быть установлена стабильная связь между уровнем и расходом воды. При отсутствии устойчивой естественной контроли для низких расходов необходимо сооружение искусственного контрольного сечения;

- f) имеется место выше гидрометрического створа, на котором можно установить будку самописца уровня воды с минимальной вероятностью повреждения обломками, переносимыми рекой, в период паводков. Отметка максимального подъема уровня, регистрируемая самописцем, должна быть выше любого паводка, ожидаемого за период действия станции;
- g) гидрометрический створ расположен на достаточном расстоянии вверх по течению от места слияния с притоком или от участка с приливно-отливными явлениями, чтобы исключить возможное влияние в результате колебаний уровня притока или влияние приливов на измеряемый уровень;
- h) вблизи выбранного гидрометрического створа имеется удовлетворительный участок для измерения расхода при любых уровнях, поскольку необязательно низкие и высокие расходы измерять в одном и том же поперечном сечении;
- i) к участку имеются подходы для удобства установки оборудования и эксплуатации гидрометрической станции;
- j) если требуется, можно установить телеметрическое оборудование или спутниковую связь;
- k) при наличии ледовых явлений сохраняются условия для регистрации уровня и измерения расхода.

Часто случается, что невозможно найти участок, удовлетворяющий всем этим требованиям. В этом случае приходится выбирать наиболее благоприятный участок для размещения гидрометрической станции.

### 12.3 Контроль связи между уровнем и расходом

Особенность русла или сочетание таких особенностей, которые регулируют связь уровня и расхода воды, известны как контрольные сечения. По одной классификации, различаются поперечные контрольные сечения и русловые контрольные сечения. По другой — выделяются естественные и искусственные контрольные сечения.

Поперечное контрольное сечение возникает в русле в местах, где геометрия отдельного сечения такова, что вызывает сжатие потока, или где существует резкий перепад в уклоне ложа русла. Сужение потока может вызываться местным подъемом ложа, например, в местах выхода скальных пород или естественных стремнин, или при сооружении водосливов и дамб. Сжатие потока может быть следствием уменьшения его ширины по естественным причинам или в результате человеческой деятельности в русле реки, например, при строительстве моста происходит значительное сужение потока, по сравнению с его естественным состоянием.

Русловое контрольное сечение существует в местах, где геометрия и шероховатость длинного участка ниже гидрометрического створа являются элементами, регулирующими связь уровня и расхода. Длина участка, который оказывает влияние в качестве контрольного сечения, увеличивается с увеличением расхода. Обычно, чем слабее градиент потока, тем длиннее участок руслового контроля.

Часто для создания искусственного контрольного сечения в русле сооружаются низкие плотины, водосливы или лотки. Такие контрольные сечения затапливаются при больших расходах, но в диапазоне низких и средних расходов они дают устойчивую связь уровня и расхода.

Хорошее контрольное сечение характеризуется двумя важными свойствами — стабильностью, которая обеспечивает устойчивую зависимость между уровнем и расходом; и чувствительностью, в результате которой небольшие изменения расхода приводят к существенному изменению уровня.

## 12.4 Измерительные сооружения

На некоторых гидрометрических створах целесообразно устраивать искусственные контроли таких очертаний, чтобы зависимость расхода от напора могла быть определена без тарирования сооружения, т. е. с помощью формул гидравлики. Существует ряд водосливов и гидрометрических лотков с хорошо изученными зависимостями расходов от напоров воды. Однако точные результаты по разработанным формулам могут быть получены только при благоприятных полевых условиях. Поэтому, если подобные сооружения используются для определения расхода воды непосредственно по отсчетам уровня воды, то очень важно обеспечить высокое качество их строительства и эксплуатации, а также применение наиболее пригодной расчетной формулы [1–6].

При менее благоприятных условиях необходима полевая тарировка сооружения для установления степени отклонения зависимости между расходом и напором от стандартной расчетной формулы, или следует заново определить эту зависимость. В таком случае особенно важно периодически измерять расход при низком стоке другими методами для того, чтобы обнаружить изменения в коэффициенте расхода, вследствие отложения наносов в верхнем бьефе или зарастания водослива или лотка водорослями.

В настоящем *Руководстве* приводятся лишь общие указания относительно выбора типа и эксплуатации водосливов и лотков на гидрометрических станциях. Подробная информация об их геометрических характеристиках и формулах зависимости расхода от напора содержится в работе BMO *Use of Weirs and Flumes in Stream-gauging* [7] (Применение лотков и водосливов при измерении расхода воды).

### 12.4.1 Типы сооружений

Водосливы и лотки, применяемые на гидрометрических станциях, можно разделить на три группы:

- a) тонкостенные водосливы: обычно устанавливаются на небольших водотоках с чистой (без наносов) водой или на небольших экспериментальных водосборах;
- b) лотки: устраиваются на небольших реках и каналах, несущих наносы и мусор, или в тех случаях, когда потери напора у тонкостенных водосливов оказываются неприемлемыми;
- c) водосливы с широким порогом, с треугольным и закругленным профилем применяются на более крупных водотоках.

Водосливы и лотки могут быть незатопленными и затопленными. В первом случае, расход является функцией уровня воды в верхнем бьефе и возможно точное тарирование сооружения. Во втором случае, расход является функцией уровня воды как в верхнем, так и в нижнем бьефе, и при тарировании в лабораторных условиях достигается меньшая точность. На многих створах водосливы или лотки используются только для измерения малых расходов, а для больших расходов зависимость между уровнем и расходом определяется с помощью непосредственных методов измерения расхода.

#### **12.4.2      Выбор типа сооружения**

Выбор гидрометрического измерительного сооружения определяется амплитудой расхода воды, требуемой точностью измерений, напором, стоимостью сооружения и характеристиками потока и русла на участке. При выборе сооружений следует руководствоваться следующими критериями:

- a) стоимость сооружения обычно является определяющим фактором в принятии решения о его строительстве. Она зависит в основном от ширины реки и условий ложа и берегов. Ширина реки определяет размеры сооружения, а структура и тип пород, слагающих ложе и берега, — тип сооружения, который выбирается из условий минимальной фильтрации под сооружением и в обход него;
- b) выбор измерительного сооружения определяется характеристиками русла и условиями течения. Факторы, влияющие на скорость потока или число Фруда, а также влекомые наносы и устойчивость русла, необходимо учитывать при проектировании сооружения;
- c) три фактора — диапазон измеряемых расходов, требуемая чувствительность и допустимый максимум потери напора — также должны учитываться при выборе типа гидрометрического сооружения, его формы и отметки порога. Чувствительность сооружения, т. е. изменение уровня в соответствии с изменением расхода при низком стоке, может потребовать сооружения либо V-образного водослива, либо водослива с горизонтальным порогом.

#### **12.4.3      Измерение напора**

Напор в устройстве обычно измеряется вверх по течению на расстоянии от устройства, приблизительно в три раза превышающем контрольную глубину воды на максимальном уровне  $h_{max}$ , при которой эффективен контроль поперечного сечения.

Некоторые водосливы особой конфигурации и все лотки требуют измерения уровня на заданных расстояниях от контрольного сечения, которые отличаются от общего правила трех  $h_{\max}$ . Описание расположения водомерного устройства или его измерительной части в этих особых случаях содержится в [7]. При эксплуатации гидрометрического сооружения нулевая отметка водомерного устройства должна быть установлена на уровне порога и регулярно контролироваться.

#### 12.4.4 Эксплуатация измерительных сооружений

Как само русло, так и измерительные сооружения в нем, подвержены со временем изменениям, которые влияют на связь расхода и напора. На подходном участке или у самого сооружения могут отлагаться песок, камни, мусор. Летом гребень плотины могут покрыть водоросли, зимой на сооружении может образовываться лед.

Для обеспечения точных непрерывных наблюдений нужно очищать подход к водосливу от скоплений наносов и растительности. С измерительного сооружения следует удалять мусор, водоросли, лед. Нужно своевременно производить ремонт поврежденных частей сооружения. Необходимо периодически проверять высотное положение водомерного устройства. Также следует проводить периодические измерения расхода для выявления возможных изменений начальной тарировки.

#### 12.5 Зависимость между уровнем и расходом

Связь уровня и расхода воды для большинства гидрометрических станций устанавливается путем построения графика, на котором измеренные расходы откладываются по оси абсцисс, а соответствующие им уровни — по оси ординат [8]. Вид кривой расходов является функцией геометрических характеристик русла ниже измерительного створа. В прямоугольных координатах кривая обычно обращена выпуклостью вверх. При построении графика на логарифмической клетчатке кривая на участке средних и высоких уровней приближается к прямой, если уровень представляет эффективный напор на контроли для средних и высоких уровней. Кривую расходов обычно представляют в графическом или табличном виде, так как только линейная часть зависимости между расходом и уровнем поддается математическому описанию.

На многих участках расход не является однозначной функцией уровня, поэтому для получения кривой расходов необходимо проводить непрерывные измерения дополнительных переменных. Например, в случаях, когда на гидрометрический створ действует переменный подпор от впадающего ниже притока, или влияют приливы и работа нижерасположенного водохранилища, необходимо оборудовать вспомогательный пост для непрерывного измерения колебаний водной поверхности на измерительном участке. При неустановившемся течении и малых уклонах направление изменения уровня может стать важной переменной, причем расход, который появляется в фазе подъема, может соответствовать более низкому уровню, чем такой же расход в фазе падения уровня.

### 12.5.1      *Устойчивость зависимости между уровнем и расходом*

Устойчивость связи уровня и расхода непосредственно зависит от стабильности контрольного сечения. Основной причиной изменений, происходящих в естественном контрольном сечении, являются большие скорости течения воды. На естественные контрольные сечения в скальных обнажениях большие скорости не оказывают влияния, но галечные, гравийные и песчаные русла легко деформируются, причем из перечисленных наибольшей сопротивляемостью обладают галечные русла, наименьшей — песчаные. Из естественных контрольных сечений наиболее изменчивыми из-за скоростной эрозии и отложений являются сечения в песчаных руслах.

Растительность в контрольном сечении завышает уровень для данного расхода, особенно при низком стоке. Она также ухудшает связь расходов с уровнями, уменьшая скорости течения и эффективную площадь водного потока. В районах с теплым климатом каждую осень опавшая листва засоряет контрольное сечение и завышает его действительную отметку. Поэтому его нужно постоянно очищать от листьев.

Ледяной покров также оказывает влияние на связь уровня и расхода, вызывая подпор, который может быть различным в зависимости от количества и характера льда. Если контрольное сечение остается открытым от льда, а измерительное устройство расположено недалеко от него, то вероятно не будет влияния подпора, даже если лед закроет весь подводящий участок. В этом случае ледяной покров будет снижать скорость течения на подводящем участке, и это влияние будет, вероятно, слабым. Однако, если измерительное устройство находится на значительном расстоянии вверх от контрольного сечения, то поверхностный лед на подводящем участке может вызвать подпор, так как закрытый льдом подводящий участок становится как бы частью руслового контрольного сечения.

Поверхностный лед, образовавшийся ниже контрольного сечения, может вызвать затор и значительный подпор воды, распространяющийся на контрольное сечение. Донный лед может образовывать напластования на дне русла или естественного контрольного сечения, повышая уровни и оказывая влияние на расход. Величина влияния ледовых условий может быть точно установлена только путем измерений расхода и наблюдений за соответствующими уровнями, которые затем анализируются и сравниваются с соответствующими уровнями и расходами при открытом русле.

В разделе 11.2.5 рассматриваются различные дополнительные аспекты, которые необходимо учитывать при измерении расхода в ледовых условиях.

Искусственные контрольные сечения позволяют устраниć или смягчить многие из нежелательных характеристик естественных сечений. Они не только физически стабильны, но и не подвергаются периодическому или прогрессирующему застанию водной растительностью. Водоросли в виде слизи,

которые иногда образуются на искусственных контрольных сечениях, легко удаляются проволочной щеткой, и, кроме того, искусственные устройства самоочищаются от опавшей листвы. В умеренно холодном климате искусственные контрольные сечения в меньшей степени подвержены влиянию ледовых образований, чем естественные. Однако, если само контрольное сооружение остается неизменным, то на связь уровня с расходом может оказывать влияние изменение скорости в подводящем канале, вызванное эрозией, отложением наносов или растительностью.

### 12.5.2      *Частота измерений расхода воды*

При планировании числа измерений расхода воды и их распределения в течение года следует учитывать следующие факторы:

- a) устойчивость зависимости между уровнем и расходом;
- b) сезонные характеристики и изменчивость расхода;
- c) доступность створа в различные времена года.

Для определения зависимости между уровнем и расходом по всей амплитуде уровней на вновь открытой станции, сначала необходимо провести значительное количество измерений расхода воды. Затем измерения расхода следует проводить периодически, чтобы следить за изменением зависимости уровня от расхода. Ежегодно рекомендуется делать не менее 10 измерений.

Первостепенное значение имеют высококачественные измерения расхода во время паводков и ледостава. Важно, чтобы в программе работ станции были предусмотрены внеплановые измерения расхода в эти периоды.

Там, где важно вести учет стока непрерывно в течение всего года, измерения расхода воды, как правило, следует проводить учащенно в периоды, когда река находится под ледяным покровом.

В периоды замерзания и вскрытия измерения следует вести как можно чаще, так как в это время наблюдается исключительная изменчивость стока. В середине зимы частота измерений расхода воды будет зависеть от климатических условий, доступности, размеров реки, характеристик зимнего стока и требуемой точности. В районах с очень холодным климатом, где расход зимой уменьшается по плавной кривой, требуется меньше измерений, чем на реках с чередующимися вскрытиями и замерзаниями.

### **Список литературы**

1. World Meteorological Organization, 1986: *Methods of Measurement and Estimation of Discharges at Hydraulic Structures*. Operational Hydrological Report No. 26, WMO-No. 658, Geneva.

2. International Organization for Standardization, 1980: *Water Flow Measurement in Open Channels Using Weirs and Venturi Flumes*. Part 1: Thin-plate weirs. ISO 1438, Geneva.
3. International Organization for Standardization, 1989: *Liquid Flow Measurement in Open Channels by Weirs and Flumes: Rectangular Broad-crested Weirs*. Second edition, ISO 3846, Geneva.
4. International Organization for Standardization, 1977: *Liquid Flow Measurement in Open Channels by Weirs and Flumes: End-depth Method for Estimation of Flow in Rectangular Channels with a Free Overfall*. ISO 3847, Geneva.
5. International Organization for Standardization, 1983: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Rectangular Trapezoidal and U-shaped Flumes*. ISO 4359, Geneva.
6. International Organization for Standardization, 1984: *Liquid Flow Measurement in Open Channels by Weirs and Flumes: Triangular Profile Weirs*. Second edition, ISO 4360, Geneva.
7. World Meteorological Organization, 1971: *Use of Weirs and Flumes in Stream-gauging*. Technical Note No. 117, WMO-No. 280, Geneva.
8. International Organization for Standardization, 1981: *Liquid Flow Measurement in Open Channels*. Part 1: Establishment and operation of a gauging station and Part 2: Determination of the stage discharge relation. ISO 1100, Geneva.

## ГЛАВА 13

### РАСХОД НАНОСОВ

#### 13.1       **Общие положения**

[E09]

Наносы переносятся потоком воды различным образом. Наносы могут скользить или перекатываться по дну, передвигаться скачками у дна или вымываться из русла и оставаться во взвешенном состоянии. Характер движения наносов зависит от физических характеристик (размера и формы, удельного веса и т. д.), гранулометрического состава, а также от скорости и глубины потока. В естественных потоках различные фазы переноса наносов обычно протекают одновременно и между ними нельзя провести четкой границы. Однако для удобства анализа расход наносов принято делить на две категории: на расход взвешенных наносов и расход донных (влекомых) наносов. В последние входят наносы, скользящие и перекатывающиеся по дну или передвигающиеся у дна скачкообразно.

В данной главе представлены руководящие положения по сбору данных о расходе наносов; более полную информацию о переносе наносов можно найти в *WMO Manual on Operational Methods for Measurement of Sediment Transport* [1] (Наставление ВМО по оперативным методам измерения переноса наносов).

#### 13.2       **Выбор створа**

При выборе створа для измерения расхода наносов применяются те же критерии, что и при выборе створа для измерения расхода воды (разделы 11.2.1 и 12.2).

#### 13.3       **Измерение расхода взвешенных наносов**

##### 13.3.1      **Приборы для взятия проб и измерительные устройства**

[C10]

Применяются несколько типов батометров для взятия проб взвешенных наносов, например: мгновенные, бутылочные, насосные, составные. Но только некоторые из них конструируются таким образом, чтобы скорость воды во входном отверстии была равна скорости течения потока. Соблюдение этого условия весьма важно для того, чтобы взятая пробы была действительно representative для расхода наносов в месте измерения. Конструкция батометра должна предусматривать, чтобы его входное отверстие было направлено против течения, было выдвинуто вперед и находилось бы вне зоны нарушения структуры течения прибором.

В батометре мгновенного типа ловушка для взятия проб обычно представляет собой горизонтально установленный цилиндр, на обоих концах которого имеются быстро закрывающиеся клапаны, позволяющие отбирать пробы за любое нужное время и на любой глубине. Пробоотборником может быть самая простая бутылка с закрывающейся пробкой с входом различного диаметра, или полностью открытая. Когда бутылка открыта, то воздух в ней замещается водой, образуя пузырьки и постепенно замедляя наполнение. Следовательно, бутылочный батометр не является пробоотборником мгновенного типа.

Батометр насосного типа всасывает смесь воды с наносами насосом или через шланг, входное отверстие которого располагается в точке отбора пробы. Регулируя скорость всасывания, оператор может получить пробу, которая характеризует содержание наносов в точке измерения. Составной батометр имеет металлический обтекаемый корпус, снабженный хвостом-стабилизатором для установки прибора по течению. Сам пробоотборник размещен в корпусе батометра. Приемник батометра состоит из выступающего носика переменного диаметра для забора пробы из потока. Сбоку в приемнике батометра имеется выходное отверстие, направленное по течению, предназначенное для выхода воздуха, вытесняемого поступающей водой. В приемной части смонтированы клапанные механизмы, которыми управляет наблюдатель с помощью электрического привода, открывая и закрывая их для взятия пробы.

Сравнительно новым методом определения расходов взвешенных наносов в точке является применение оптических или ядерных измерителей. Принцип работы этих приборов основан на том, что видимое излучение X-лучей, испускаемое источником с постоянной интенсивностью, рассеивается и/или поглощается частицами взвешенных наносов. Уменьшение интенсивности, измеряемое фотоэлектрическим или ядерным детектором, расположенным на противоположной стороне от источника, пропорционально концентрации наносов при условии, что другие сопутствующие характеристики воды и наносов (растворенные химические и минеральные вещества и т. п.) остаются неизменными.

Общая конструкция батометра должна быть проверена путем равномерного перемещения его в стоячей воде с заданной скоростью или путем помещения его в поток воды с известной скоростью. Оптические и ядерные измерители должны быть откалиброваны путем отбора проб в лотках или естественных потоках с наносами параллельно с измерениями батометрами другого типа.

### 13.3.2 *Порядок измерений*

Пробы взвешенных наносов на реках берутся в тех же створах, в которых измеряется расход воды, но не обязательно в скоростных вертикалях. На озерах вертикали для отбора проб взвешенных наносов располагаются по всей площади, потому что здесь измерения обычно выполняются для определения распределения концентраций наносов во времени и пространстве. Батометры подвешиваются в воде на штанге или тросе.

На реках применяются два метода измерения расходов, которые дают сравнимые результаты:

- a) выбранное поперечное сечение разделяется на 3–10 участков с примерно одинаковым расходом воды. В центре каждого участка на одной вертикали берется интегральная по глубине пробы (раздел 17.2.3.1) путем опускания батометра с равномерной скоростью от поверхности до дна и наоборот. В результате получается пробы, взвешенная по расходу наносов на каждом участке;
- b) по ширине реки примерно на одинаковых расстояниях выбирается 6–10 вертикалей, на каждой из которых берется интегральная по глубине пробы путем равномерного опускания батометра. При таком способе все пробы могут входить в состав одной репрезентативной пробы для данного створа [2].

Пробы могут отбираться в точках, равномерно распределенных по вертикали, каждой полученной при этом пробе придается вес, равный отношению скорости течения в данной точке к средней скорости на вертикали. На практике этот метод измерения расхода наносов объединяется с измерением расхода воды (раздел 11.2.4), так как вертикали для измерения скорости течения и для отбора проб взвешенных наносов совпадают.

Оптические и ядерные измерители наносов могут применяться как для точечных, так и для интегральных измерений, если электрические сигналы, подаваемые детектором суммируются счетчиком импульсов. В зависимости от статистических характеристик счетчика импульсов конкретного устройства, период счета колеблется от 3 до 5 минут.

### 13.3.3 *Определение концентрации наносов*

Пробы взвешенных наносов обычно обрабатываются и анализируются в специальных лабораториях, где после отстаивания в течение 1–2 дней в них отделяются наносы путем выпаривания или фильтрования, которые затем сушатся при температуре около 110 °C и взвешиваются. Если наносы отделялись от воды выпариванием, то должна вводиться поправка на испарение. Концентрация взвешенных наносов выражается в  $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$  или в  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Для того чтобы в пробе содержалось поддающееся измерению количество наносов, в таблице ниже приведены рекомендуемые объемы отбираемых проб.

#### **Объемы проб при измерении взвешенных наносов**

<i>Ожидаемое содержание взвешенных наносов (<math>\text{г}\cdot\text{м}^{-3}</math>)</i>	<i>Объем пробы взвешенных наносов</i>
> 100	1
50 – 100	2
20 – 30	5
< 20	10

В некоторых странах стандартные батометры имеют емкости в 1 литр и менее. В этом случае необходимо повторять отбор проб до тех пор, пока не будет получен рекомендуемый объем пробы [2].

При использовании оптического или ядерного измерителя концентрация наносов в точке определяется по калибровочным кривым этих приборов на основании отношения интенсивности светового или Х-излучения, полученного в пробе, к интенсивности излучения в чистой воде.

#### 13.3.4 *Расчет расхода взвешенных наносов*

По первому методу измерений (раздел 13.3.2) средне-взвешенная концентрация наносов  $\bar{c}_s$  в  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$  для всего поперечного сечения рассчитывается по формуле

$$\bar{c}_s = \frac{\sum c_q q_p}{\sum q_p}, \quad (13.1)$$

где  $q_p$  — частичный расход воды на участке поперечного сечения,  $\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $c_q$  — концентрация наносов по вертикали в центре участка,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$  [3].

По второму методу измерения содержание наносов, определяемое по пробе, в состав которой входят пробы, взятые на всех выбранных вертикалях, представляет собой среднюю концентрацию наносов в створе измерения. Ежедневный расход взвешенных наносов  $Q_s$  рассчитывается по формуле

$$Q_s = 86,4 \bar{c}_s Q, \quad (13.2)$$

где  $Q_s$  — расход взвешенных наносов,  $\text{т}\cdot\text{сут}^{-1}$ ;  $Q$  — расход воды,  $\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$ .

#### 13.3.5 *Непрерывный учет расхода взвешенных наносов*

Непрерывный учет расхода взвешенных наносов можно осуществлять, используя непрерывные данные по речному стоку, а также путем систематического отбора проб на содержание наносов. В период межени пробы берутся один раз в сутки, в период паводков — более часто. Наиболее ценную информацию об изменении во времени содержания наносов и их максимальных значений в период паводков можно получить по непрерывной записи сигналов, поступающих от оптических или ядерных измерителей взвешенных наносов. Максимальное содержание наносов обычно предшествует пику паводка, причем на графиках связи расхода воды и расхода взвешенных наносов можно наблюдать петли, подобные петлям кривых расхода воды в паводочные периоды.

Пробы или записи наблюдений собираются по отдельным вертикалям поперечного сечения, лучше всего использовать интегральный по глубине метод. По детальным измерениям распределения наносов в поперечном сечении (см. раздел

13.2.2) устанавливается зависимость между содержанием наносов на данной вертикали и во всем створе. Эта зависимость необязательно является линейной и постоянной как на протяжении всего года, так и не во всем диапазоне колебаний содержания наносов.

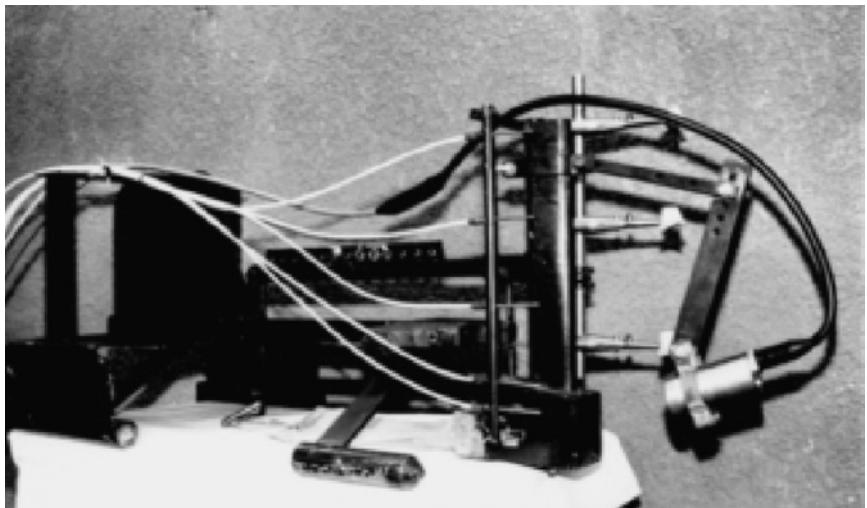
### 13.4 Измерение расхода донных наносов

#### 13.4.1 Приборы

[C12]

Полевые измерения расхода донных наносов представляют определенные трудности в связи со стохастической природой перемещения донных наносов, а также тем, что донные отложения передвигаются в виде рифелей, песчаных баров и гряд. Ни один из разработанных приборов в полной мере не отвечает требованиям одинаковой эффективности при улавливании наиболее крупных и мелких частиц наносов, сохранения устойчивого положения при ориентировании по течению придонного потока без внесения искажений в него и в движение донных наносов. Существующие приборы для измерения донных наносов можно разделить на три типа: батометры-корзинки, батометры-ловушки и батометры, основанные на разности давлений на входе и на выходе [3].

Батометры-корзинки обычно изготавливаются из сетчатого материала с отверстием в верхнем конце, через которое поступает смесь воды с наносами. Сетчатый материал должен пропускать взвешенные наносы, но удерживать наносы, движущиеся по дну.



Прибор “Дельфта-Нила”, состоящий из батометра для донных и взвешенных наносов, а также подводной видеокамеры.

Батометры-ловушки обычно в продольном разрезе имеют форму клина и располагаются на дне таким образом, что острие клина обращено против течения. Ловушка имеет прорези или щели для задержания движущихся наносов.

У батометров, действие которых основано на разности давления, создается пониженное давление при выходе из прибора, достаточное для преодоления потерь энергии и для создания скорости течения воды при входе в прибор, равной скорости течения в ненарушенном потоке. Диафрагма с отверстиями внутри корпуса пробоотборника вынуждает поток осаждать наносы в специальной камере, а воду — выходить через верхнее отверстие.

Для каждого типа батометров необходимо определить коэффициент эффективности из-за различных неопределенностей, возникающих при отборе проб. Батометры обычно тарируются в лабораторных лотках, в которых можно непосредственно измерить расход донных наносов в отстойнике, помещенном в конце лотка, даже если трудно поддерживать однородные условия перемещения наносов по ширине и длине лотка. Коэффициенты эффективности измерения донных наносов трудно оценивать даже при благоприятных условиях, поскольку они зависят от гранулометрического состава наносов, степени наполнения пробоотборника и др. В связи с этим эффективность в 60–70 % может считаться удовлетворительной.

### 13.4.2 *Порядок измерения*

Расход донных наносов определяется количеством наносов в единицу времени, собранных батометром в одной или более точках на дне речного потока. В поперечном сечении реки обычно должно быть от 3 до 10 точек измерений. При определении точек отбора проб следует учитывать то, что, за исключением периода паводков, перемещение донных наносов происходит только в части ширины реки.

Включение измерения с нулевым значением в расчет расхода донных наносов может приводить к ошибкам в результатах расчета, даже если эта точка измерения располагалась между двумя перемещающимися грядами наносов. Погрешности могут также возникать, если измеренную скорость перемещения наносов распространить на участки поперечного сечения реки с низкими и нулевыми скоростями перемещения.

В потоках, имеющих гравийное русло, для которых наиболее характерно перемещение наносов по отдельным сегментам поперечного сечения, для решения этой проблемы существенную помощь могут оказать акустические детекторы различного типа. Находясь вблизи дна потока, эти детекторы отбирают звуки перемещающегося гравия, указывая на движение донных наносов в данной конкретной точке. Кроме того, интенсивность звука и скорость перемещения донных наносов могут иметь корреляционную связь.

Батометры опускаются на дно идерживаются в нужном положении на штанге или тросе. Измерение обычно продолжается несколько минут в зависимости от

размеров батометра и скорости перемещения наносов. При малых скоростях течения у дна горизонтальная составляющая действующей силы уменьшается, батометр может погружаться в ложе и зачерпывать отложения, не являющиеся донными наносами. Аналогичные явления могут происходить при резком и неосторожном опускании батометра.

Измерения расхода наносов необходимо проводить при различных расходах воды, чтобы установить связь между расходом воды и расходом донных наносов. Из-за высокой сложности механизма изучаемого процесса, вероятностной природы перемещения наносов и возможных погрешностей отбора проб, одна единственная проба в точке измерения может приводить к весьма неопределенной оценке истинного перемещения наносов. Поэтому в каждой точке необходимо проводить несколько отборов проб. Число повторных измерений зависит от местных обстоятельств. Однако статистический анализ полевых данных, полученных при 100-кратных повторных измерениях, показал, что расход донных наносов может быть измерен только с ограниченной точностью, если в каждой точке не будет взято неограниченно большое число проб.

#### 13.4.3      *Расчет расхода донных наносов*

Наносы, собранные батометром, высушивают и взвешивают. Разделив сухой вес наносов на время, потребовавшееся для взятия пробы, и на ширину приемного отверстия батометра, получают расход донных наносов на единицу ширины реки в точке измерения  $qb$ . Кривая распределения элементарных расходов по ширине реки  $qb$  строится по данным измерений в каждой точке. Площадь, заключенная между этой кривой и линией поверхности воды, представляет собой суточный расход донных наносов по всему поперечному сечению  $Q_b$ . Величина  $Q_b$  может также рассчитываться на основании измеренных  $qb$  данных следующим образом:

$$Q_b = 86,4 \left[ \frac{q_{b1}}{2} x_1 + \frac{q_{b1} + q_{b2}}{2} x_2 + \dots + \frac{q_{bn-1} + q_{bn}}{2} x_{n-1} + \frac{q_{bn}}{2} x_n \right], \quad (13.3)$$

где  $Q_b$  — расход донных наносов,  $\text{т}\cdot\text{сут}^{-1}$ ;  $qb$  — элементарный расход,  $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ; и  $x$  — расстояние, м. Переменная величина  $x$  представляет собой расстояние между точками измерения или между начальной точкой измерений и кромкой воды, или краем полосы передвижения наносов.

Плотины, задерживающие большую часть донных наносов, влекомых на участках верхнего бьефа, дают возможность оценить расход наносов за год или за сезон. Для этой цели в водохранилище выбираются профили для измерения и вычисления объемов отложившихся наносов. Этот метод, в сочетании с регулярными отборами проб в верхнем и нижнем бьефах, может дать приемлемые оценки расходов донных наносов.

#### 13.4.4 *Непрерывный учет расхода донных наносов*

Непрерывный учет расхода донных наносов может осуществляться по связи расхода донных наносов с расходом воды или другими гидравлическими переменными, за которыми ведутся наблюдения. Можно предположить, что для расхода воды такая связь приближается к линейной, выше некоторого предельного значения расхода воды, соответствующего началу движения наносов, поскольку транспортирующая способность потока прямо пропорциональна его расходу воды. Перемещение донных наносов представляет основной интерес во всех исследованиях, касающихся вопросов изменения и деформации речных русел.

#### **Список литературы**

1. World Meteorological Organization, 1989: *Manual on Operational Methods for the Measurement of Sediment Transport*. Operational Hydrology Report No. 29, WMO-No. 686, Geneva.
2. International Organization for Standardization, 1977: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Methods of Measurement of Suspended Sediment*. ISO 4363, Geneva.
3. International Organization for Standardization, 1977: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Bed Material Sampling*. ISO 4364, Geneva.

## ГЛАВА 14

### ЛЕД НА РЕКАХ, ОЗЕРАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ

#### 14.1        **Общие положения**

В районах, где образование льда затрагивает интересы судоходства или приводит к повреждениям гидротехнических сооружений, и где происходят ледяные заторы (даже обраzuя подпор в основном русле), наблюдения за ледовой обстановкой на реках, озерах и водохранилищах представляют большой интерес. Стеснение русла льдом может вызывать серьезные местные затопления. Многолетние наблюдения за ледовой обстановкой на реках исключительно важны при проектировании различных сооружений, изучении процессов образования и разрушения льда, а также при разработке методов ледовых прогнозов.

#### 14.2        **Элементы ледового режима**

Наиболее важными элементами ледового режима, которые подлежат наблюдениям, являются следующие:

- a) даты первого появления плавучего льда;
- b) отношение площади поверхности дрейфующего льда к площади поверхности воды, свободной от льда (коэффициент ледяного покрова);
- c) отношение площади поверхности дрейфующего льда к стационарной ледовой поверхности;
- d) даты ледостава;
- e) толщина льда;
- f) процесс разрушения льда;
- g) даты вскрытия;
- h) даты полного очищения рек и водохранилищ ото льда.

#### 14.3        **Методы наблюдений**

Большинство из элементов, перечисленных в разделе 14.2, не могут быть измерены приборами и оцениваются визуально (субъективно), а результаты наблюдений излагаются в описательной форме. Поэтому очень важно, чтобы наблюдатель был хорошо подготовлен к наблюдениям и чтобы имелись четкие инструкции по проведению таких наблюдений.

Толщина льда измеряется с помощью ледового бура и ледомерной рейки в репрезентативных точках. С целью снижения ошибок измерений, вызванных пространственной изменчивостью толщины льда, измерения следует проводить не менее чем в трех

точках, удаленных друг от друга на расстояние не менее 5 м, а результаты измерений усредняются. Необходимо также измерять высоту снега на льду.

На реках с навигацией для точного указания местоположения участков, на которых обычно проводится ледомерная съемка, можно использовать километровые знаки или искусственные сооружения. Особенно опасные явления (например затоны или зажоры) следует указывать по отношению к другим ориентирам (например: мостам, сооружениям русского регулирования и портам).

Определение некоторых характеристик ледовых явлений может проводиться методом регулярной фотограмметрической съемки с точек, расположенных на берегу, или путем аэрофотосъемки. На крупных реках, озерах или водохранилищах наблюдения с самолета за образованием и вскрытием льда представляют особую ценность. Они также полезны в случае ледовых заторов, когда необходимо предупредить о наводнении.

При проведении съемки ледовых условий на участке, ширина полосы  $s$  и высота полета  $h_f$  могут быть определены в виде функции длины фокуса  $L_f$ , применяемой фотокамеры и эффективной ширины  $l$  кадра пленки  $h_f = s(L_f/l)$ . Поскольку величина  $L_f$  является постоянной для фотокамеры и приблизительно равна 1,0, то ширина полосы съемки приблизительно равна высоте полета. Посредством повторных аэрофотоснимков, через промежутки времени в несколько минут, наряду с характером ледяного покрова, можно определить и скорость движения льда. Если известна средняя толщина льда, то может быть вычислен также и расход (пропускная способность) льда.

Данные телевизионного или дистанционного зондирования, получаемые с метеорологических и геофизических искусственных спутников, также очень полезны для оценки ледовых условий на озерах и водохранилищах [1].

#### **14.4 Сроки и частота наблюдений**

Наблюдения за состоянием льда проводятся одновременно с наблюдениями за уровнем воды, в то время, как измерения толщины льда и высоты снега на основных реках, озерах и водохранилищах должны проводиться через каждые 5–10 дней, в критические периоды образования и вскрытия ледового покрова. Наблюдения с самолетов со специальными целями выполняются по мере необходимости.

#### **14.5 Точность измерений**

Из-за трудных условий ледовые измерения не могут быть очень точными. Однако погрешность измерения толщины льда не должна превышать 10–20 миллиметров или 5 %, независимо от его толщины.

#### **Список литературы**

1. Прокачева В. Г. Оценка пригодности телевизионной информации метеорологических ИСЗ «Метеор» для определения ледовой обстановки на озерах и водохранилищах. — *Тр. ГПИ*, 1975, № 205, с. 115–123.

## ГЛАВА 15

### ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

#### 15.1        **Общие положения**

Приборы и методы для определения влажности почвы можно разделить на две основные группы:

- a) методы, основанные на определении содержания почвенной влаги;
- b) методы, с помощью которых измеряют потенциал почвенной влаги.

Содержание почвенной влаги выражается в виде отношения массы воды, содержащейся в пробе почвы, либо к сухой массе пробы почвы, либо к начальному объему пробы. Эти два выражения линейно связаны через коэффициент, который известен как сухой объемный вес отобранный почвы.

Потенциал влажности почвы выражает потенциальную энергию воды, содержащейся в почве и состоящей из гравитационной, напорной и осмотической составляющих. В большинстве случаев смесь почвенной влаги можно рассматривать как однородную, и тогда осмотический потенциал не учитывается. Гравитационный потенциал представляет собой работу, затраченную на подъем воды из данной точки в почве на определенную высоту, которой обычно является поверхность почвы. Поскольку гравитационный потенциал можно вычислить, проблема измерения потенциала влажности почвы заключается в измерении напорной составляющей. Для измерения напорного потенциала используют различные методы, как прямые так и косвенные. Наиболее широко применяемые методы рассмотрены ниже.

Независимо от применяемого метода, в любом случае, очень важно определить влажность почвы в нескольких точках исследуемого участка, вследствие большой пространственной изменчивости этого элемента. Статистический анализ изменчивости влажности почвы, измеренной во многих точках, дает возможность вычислить погрешность средних величин. Такой анализ позволяет установить требуемое число точек измерений, необходимое для заданной точности определения средней величины. Более детально вопросы измерения влажности почвы рассмотрены в работе BMO *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* [1] (Измерения снежного покрова и пространственная оценка осадков и влажности почвы).

#### 15.2        **Гравиметрический метод**

Единственным методом прямого измерения влажности почвы является гравиметрический метод. Он заключается во взятии почвенной пробы, взвешивании ее до

и после высушивания и подсчете содержащейся в ней влаги. Почвенная проба считается высущенной, если ее вес остается постоянным при температуре 105 °С. Для этого метода были разработаны различные типы оборудования для взятия проб, сконструированы специальные сушильные шкафы и весы.

Гравиметрический метод является самым точным методом измерения влажности почвы, он также необходим для тарирования приборов, применяемых во всех других методах. Однако он не может быть применен для получения непрерывных данных о влажности почвы в одной и той же точке, в связи с необходимостью удаления пробы из почвы для ее лабораторного анализа.

### 15.2.1 *Метод отбора проб*

Методика отбора проб для гравиметрического метода зависит от того, каким способом будет определяться влажность почвы — определением сухой массы пробы или ее объема. При определении сухой массы пробы может перемешиваться, а при определении объема — нет.

Процесс отбора проб сопряжен с трудностями, особенно, если почва очень сухая, либо очень влажная, или если она содержит камни, скальные обломки и другие включения, мешающие работе приборов для взятия проб.

Методика отбора проб и соответствующее оборудование должны быть таковы, чтобы при взятии проб и их транспортировке можно было избежать как потерь влаги из проб, так и поступления ее, а также повреждения проб или изменения их свойств. При взятии проб из сухого слоя почвы, расположенного под влажным слоем, необходимо сохранять оборудование, по возможности, сухим и не допускать стекания воды по скважине из влажного слоя в сухой. Если почва содержит гравитационную воду, то измеренное содержание влаги в почве может оказаться меньше действительного содержания из-за того, что некоторая часть влаги стечет по каплям при извлечении пробы из почвы, или она может быть отжата в результате сжатия пробы при ее извлечении.

Когда встречаются сухие твердые отложения тяжелого механического состава, то бывает трудно пользоваться колонковым буром или вращать почвенный бур. При взятии проб сухих отложений легкого механического состава, пробы может выскользнуть из конца колонковой трубы или из бура. Очень трудно брать пробы из каменистых почв, особенно объемные, так как при этом возникает опасность повреждения камнями режущей части инструмента, а также в связи с тем, что репрезентативная пробы должна быть большего объема. Представляют затруднения и почвы, в которых встречается много корневищ и органического вещества.

При гравиметрическом методе измерения влажности почвы, размеры отбираемого для пробы образца пропорциональны размерам и содержанию в грунте гравия: чем крупнее гравий, тем большего размера следует брать пробу. Влажность выражается в процентах по отношению к массе (весу) пробы. При умножении на объемную плотность, влажность может быть выражена в процентах по отношению к объему.

Очень важно, чтобы все операции по отбору проб для определения влажности почвы — помещение проб в бюксы, взвешивание влажных проб — проводились как можно быстрее во избежание потерь влаги. Можно избежать многих трудностей при использовании оборудования для взятия проб, если содержать его в чистоте, удаляя с него влагу и ржавчину.

### 15.2.2      *Описание пробоотборников*

#### 15.2.2.1    *Ручной бур*

Самым простым инструментом для взятия проб на влажность почвы является ручной бур. С помощью ручных буров с удлинителями из алюминиевых труб брались пробы с глубины до 17 м. Одним из наиболее распространенных типов ручных буров является бур, состоящий из цилиндра диаметром 76 мм и длиной 230 мм, снабженного в верхнем конце удлинительной трубой длиной 140 см, а в нижнем — двумя изогнутыми резцами. Поскольку приемная часть бура представляет собой массивный цилиндр, на пробу не могут воздействовать стенки скважины. Таким образом, с помощью этого оборудования можно получить хорошую, презентативную пробу, но с нарушенной структурой. Для облегчения работы на глубинах, превышающих 150 см, по мере надобности, наращиваются удлинительные секции из 19-миллиметровых алюминиевых труб длиной 90 см.

Для получения пробы грунта с помощью ручного бура, его вращают рукояткой и углубляют в грунт, из которого надо взять пробу. Обычно цилиндр бура заполняется грунтом после проходки примерно 80-миллиметрового слоя. Тогда бур извлекают на поверхность и простукивают цилиндр резиновым молотком для того, чтобы извлечь из него пробу.

#### 15.2.2.2    *Трубчатые или колонковые буры*

Некоторые типы почвенных, колонковых и ударных буров имеют то преимущество, что при взятии почвенных проб на влажность можно получать объемные пробы для расчета объемного содержания влаги. Колонковые буры дают незагрязненные пробы при условии содержания оборудования в чистоте. С оборудования необходимо удалять грязь, ржавчину и влагу, и никогда не следует применять смазку. При глубоком бурении обычно рекомендуется бригада из двух человек, при этом глубина взятия проб может достигать 20 м. Рекомендуется, чтобы объем пробы был, по меньшей мере, 100 см<sup>3</sup>.

Открытый ударный бур для взятия проб с больших глубин состоит из пробоотборника с внутренним диаметром 50 мм и длиной 100 мм и удлинительных труб диаметром 25 мм и длиной 150 см. Для удержания «ненарушенных» проб применяются латунные цилиндрические гильзы длиной 50 мм. Пробы извлекаются из пробоотборника путем выталкивания их поршнем. Для удлинения бура служит легкая буровая штанга или 15-миллиметровая труба.

Простой и экономичный бур для взятия объемных проб с небольших глубин состоит из тонкостенной латунной трубы диаметром 50 мм и длиной

150 мм, смонтированной на конце трубы длиной 90 см и диаметром 19 мм, снабженной Т-образной рукоятью. Пробы берут, вдавливая бур в почву с помощью рукояти, затем извлекают пробу из пробоотборника, выталкивая ее поршнем. Зная внутренний диаметр и площадь пробоотборника, можно легко получить объемные пробы, отрезая куски колонки грунта требуемой длины по мере извлечения колонки из пробоотборника.

### 15.2.3 *Лабораторные исследования*

Сначала отобранная влажная проба взвешивается вместе с контейнером для ее транспортировки. Затем контейнер открывается и помещается в сушильный шкаф, в котором поддерживается постоянная температура  $105 \pm 0,5$  °C. Для проб, содержащих торф или существенное количество извести, следует поддерживать температуру в сушильном шкафу  $50 \pm 0,5$  °C, хотя при такой температуре потребуется больше времени на высушивание пробы.

После того как пробы высушены, она вновь взвешивается вместе с контейнером. Разница в весе сухой и влажной пробы является мерой ее влагосодержания.

Для сушки можно использовать другие устройства, которые дают более быстрые результаты, чем обычный сушильный шкаф, например такие, как спиртовки, инфракрасные лампы или микроволновые печи.

Когда в пробе содержится гравий или обломочный материал, вышеописанную процедуру обработки можно изменить и определять вес или объем гравия и камней отдельно.

### 15.3 *Метод электросопротивления*

[C60]

Электрическое сопротивление некоторого объема (блока) пористого материала, влажность которого находится в равновесном состоянии с влажностью почвы, может служить мерой влажности почвы. В блок, изготовленный из таких материалов, как гипс, нейлон, стеклянное волокно, вводят два электрода. Контактное сопротивление остается постоянным, и если поместить блок в почву и дать ему достичь равновесного состояния с влажностью почвы, он будет подстраиваться к изменениям напряжения с небольшим запаздыванием. Изменения электрического напряжения вызываются изменениями содержания влаги и могут быть измерены измерительным прибором, вынесенным на поверхность почвы. Сопротивление, отсчитанное по измерительному прибору, преобразуется в величины влагосодержания почвы с помощью тарировочной таблицы. Тарировка составляется по корреляции с величинами влагосодержания, установленными гравиметрическим методом (раздел 15.2) для каждого слоя, в каждой точке измерений.

Считается, что блоки для измерения почвенной влажности действуют наиболее надежно при низких значениях влажности. Их пригодность для измерения содержания влаги ограничивается эффектом гистерезиса и тем фактом, что

тарировка зависит от плотности и температуры почвы. Применение таких блоков для получения количественных результатов, которые можно использовать в исследованиях водного баланса, является сомнительным.

#### 15.4        **Нейтронный метод**

[C58, E55]

С помощью нейтронного метода определяется количество воды в единице объема почвы. Объем почвы, охватываемый измерениями при этом методе, имеет шарообразную форму с радиусом от 1 до 4 метров в зависимости от влажности почвы и интенсивности излучения нейтронов источником.

Этот метод основан на принципе измерения замедления нейтронов, излучаемых в почву источником быстрых нейтронов [2]. При столкновении нейтронов с атомами, обладающими небольшим атомным весом, усиливается потеря энергии, она пропорциональна числу таких атомов, имеющихся в почве. В результате этих столкновений быстрые нейтроны становятся медленными. Водород, являющийся главным химическим элементом с низким атомным весом, находящимся в почве, содержится в большом количестве в молекулах воды почвы. Число медленных нейтронов, обнаруженных счетной трубкой после испускания быстрых нейтронов радиоактивным источником, отмечается на пересчетном устройстве с помощью электроники.

##### 15.4.1        **Приборы**

Типичный комплект оборудования состоит из переносной батареи или счетчика времени с пружинным заводом, отмечающим интервалы от 0,5 до 5 минут и весящим около 16 кг , а также зонда для измерения влажности, имеющего источник быстрых нейтронов радиоактивностью 100 милликори, излучаемых америцием-241 и бериллием (с периодом полураспада 458 лет). Длина зонда составляет около 400 мм, диаметр около 40 мм и вес 20 кг вместе со свинцовыми и парафиновыми экранами диаметром 150 мм и длиной 100 мм. Эти зонды применялись при длине кабеля до 60 м.

Источник излучения и счетчик погружают в почву по скважине, крепленной алюминиевой трубой; отсчеты можно производить на любой глубине, но не слишком близко к поверхности. Внутренний диаметр трубы должен лишь ненамного превышать диаметр зонда. Трубу следует устанавливать, по возможности, выбирая бурением грунт внутри нее для обеспечения тесного соприкосновения наружной стороны трубы с почвой.

Устройства подобного типа разработаны также для измерений в поверхностном слое почвы. В этом случае оборудование устанавливается на поверхности земли и показывает содержание почвенной влаги в полусферическом объеме радиусом от 15 до 40 см.

##### 15.4.2        **Обсадные трубы**

Установка обсадных труб должна выполняться очень тщательно с тем, чтобы предотвратить сжатие почвы и обеспечить контакт с почвой с внешней стороны этих

труб, т. е. во время их установки не должно образовываться пустот с внешней стороны. Обсадные трубы могут устанавливаться:

- a) путем помещения труб в предварительно пробуренные скважины такого-же или немного меньшего диаметра (скважины можно пробурить при помощи ручного или моторизованного спирального бура);
- b) путем забивания труб в почву молотком, с последующим удалением почвы из труб при помощи спирального бура.

Днище трубы должно быть запаяно, чтобы предотвратить инфильтрацию подземных вод. Верхний конец следует закрывать крышкой или специальной чашкой, если труба не используется.

#### **15.4.3 Тарирование**

Почвенный зонд тарируется с помощью гравиметрического метода определения влажности почвы (раздел 15.2), причем тарировка проводится на тех типах почв, на которых будут проводиться наблюдения, и в обсадной трубе такого же размера и типа, как та, в которую будет опускаться зонд. Вокруг скважины для наблюдений необходимо взять столько проб почвы, чтобы можно было построить профиль распределения влажности почвы по глубине. Трудно осуществить надежное тарирование на разнородных почвах и при влажности почвы, быстро меняющейся с глубиной. Приблизительную тарировку можно выполнить и в лаборатории, используя контейнер, заполненный почвенным материалом. Существенное влияние на показания оказывают тип и размер крепления, а также способ установки обсадной трубы, поэтому при каждом изменении установки необходимо получать новую тарировочную кривую.

#### **15.4.4 Измерения и их точность**

В обсадных трубах не должно содержаться излишней влаги, в ином случае это приведет к ошибочным показаниям.

После погружения почвенного зонда на заданную глубину в обсадную трубу, снимается ряд отсчетов за определенный период времени. Среднее показание преобразуют в содержание влаги при помощи тарировочной кривой. Точность определения, главным образом, зависит от:

- a) обоснованности тарировочной кривой;
- b) количества отсчетов за период измерения.

Ошибочные отсчеты случайного характера могут иметь место из-за случайности процесса излучения и столкновения нейтронов. Ошибки хронометрирования можно свести к минимуму, используя стандартный, равный двум минутам, временной цикл для снятия показаний.

Обычная концентрация солей в почвенной влаге не оказывает существенного влияния на результаты, получаемые с помощью нейтронного метода, но концентрация, соответствующая солености морской воды, вызывает значительный эффект. Имеются данные, свидетельствующие о влиянии температуры. На отсчеты вблизи поверхности земли оказывает воздействие положение зонда по отношению к поверхности раздела воздух—почва. Близость к этой поверхности вызывает снижение показаний по сравнению с теми, которые имели бы место при той же влажности почвы на большей глубине.

При минимизации источников ошибок, точность конкретного измерения достигает от 0,5 до 1 %. При повторных измерениях, которые обычно выполняются при изучении водного баланса, изменения влажности почвы могут быть даже более точными, поскольку исключаются систематические ошибки.

### 15.5 Гамма-абсорбционный метод

Снижение интенсивности гамма-лучей, проходящих через почву, главным образом, зависит: от плотности почвы, от воды, которая в ней содержится и от коэффициентов ослабления излучения почвой и водой, которые являются постоянными. Этот метод заключается в одновременном погружении источника гамма-лучей (обычно цезий-137) и приемника гамма-лучей (спинцилляционный кристалл с фотоумножителем) в две параллельные обсадные трубы, установленные в почве. На любом уровне измерений сигнал может преобразовываться в плотность влажной почвы или, когда известен сухой объемный вес, в параметр, характеризующий объемное содержание влаги в почве.

Измерительное оборудование дает возможность получать профили плотности влажной почвы или объемного содержания влаги в почве на несколько десятков сантиметров при условии, что сухой объемный вес остается постоянным.

Преимущество этого метода заключается в высоком пространственном разрешении (он измеряет слои почвы толщиной от 20 до 50 мм, когда обсадные трубы установлены на расстоянии около трех метров). Однако эти измерения являются косвенными в отношении воды. Существенное изменение сухого объемного веса может привести к ошибкам в измерении влажности почвы.

Довольно сложное оборудование, которое включает два источника энергии с различной интенсивностью излучения гамма-лучей, дает возможность изучить изменения плотности и влажности почвы. Такое оборудование применяется, главным образом, не в полевых, а в лабораторных условиях.

### 15.6 Диэлектрические методы

Фактическая диэлектрическая постоянная (электропроводность) некоторого объема почвы изменяется в зависимости от содержания влаги в почве. Почва

имеет сложный состав и состоит из частиц различных химических элементов, а также воды и воздуха. Диэлектрическая постоянная частиц почвы меняется в диапазоне от 2 до 7, а для воздуха и воды ее величина составляет 1 и 80 соответственно. Таким образом, если сухой объемный вес почвы остается неизменным, т. е. процентное содержание состава почвы не меняется, то ее фактическая диэлектрическая постоянная будет являться функцией количества влаги, которая находится в данной почве. Это позволяет преобразовывать измерение диэлектрической постоянной в объемное содержание почвенной влаги.

Существуют два основных диэлектрических метода:

- a) метод временного рефлектометра (МВР);
- b) емкостной метод.

В некоторых дистанционных методах, главным образом основанных на использовании активного микроволнового излучения, также применяют этот принцип для оценки влагосодержания почв, лежащих у поверхности.

#### 15.6.1 *Метод временного рефлектометра*

Скорость прохождения микроволновых импульсов между парой волновых проводников, установленных в почве, является функцией фактической диэлектрической проводимости смеси почвы воды и воздуха, находящейся между этими проводниками волн [3]. Когда скорость прохождения импульсов увеличивается, проводимость снижается, и это указывает на уменьшение содержания влаги в почве.

Установка для использования метода временного рефлектометра (МВР) состоит из:

- a) устройства МВР, в которое входит генератор импульсов, электронное устройство отсчета времени и обычно микроэлектронное устройство для хранения тарировочной связи и преобразования скорости прохождения импульсов в величину, характеризующую почвенную влагу;
- b) одной или нескольких пар волновых проводников;
- c) кабелей для подсоединения волновых проводников к устройству МВР.

Обычно волновые проводники представляют собой металлические трубы длиной 0,15–0,6 м, а длина соединительных кабелей может достигать длины в несколько метров. Волновые проводники могут устанавливаться вертикально в почве или горизонтально в стенке шурфа. Горизонтальная установка может вызывать существенные нарушения почвы вокруг волновых проводников, и тем самым приводить к ошибочным результатам при определении влажности почвы.

Волновые проводники могут устанавливаться как временно, так и постоянно. Наличие сложной аппаратуры дает возможность автоматического, последовательного сканирования нескольких пар волновых проводников.

Метод МВР очень быстрый, и измерения с его помощью проводятся почти мгновенно. В минеральных почвах он имеет высокую точность, которую можно еще улучшить, проводя тарировки для каждого вида почвы. Необходимо проводить тарирование для почв с существенным содержанием органических веществ. В соленых почвах значительные потери энергии ограничивают применение метода МВР.

Этот метод также не применяют для определения почвенной влаги в полностью мерзлых почвах, поскольку электропроводность льда и сухой почвы приблизительно одинакова. Однако метод МВР можно использовать для изучения процессов замерзания и таяния почвы и снега.

### 15.6.2      **Емкостный метод**

Емкостная установка состоит из электродов, которые погружаются в почву — электронного осциллятора, счетчика частоты и соединительных кабелей. Электроды с прилегающей почвой образуют конденсатор с емкостью, которая является функцией электропроводности почвы и соответственно содержания влаги в почве (раздел 15.6.1). Перемена емкости может измеряться изменением частоты электронного сигнала через этот конденсатор. Для преобразования емкости в содержание влаги необходимо иметь тарировочную зависимость для различной почвы.

Существуют различные схемы применения этой методики. В зависимости от размеров, электроды могут быть врыты в почву, установлены на верхней части зонда и вбиты в почву или вставлены в обсадную трубу.

Обычно чувствительный элемент снабжается механизмом, который позволяет вводить температурную поправку для того, чтобы компенсировать влияние температуры на связь между содержанием влаги и электропроводностью.

Измерения этим методом проводятся легко и быстро, но они очень зависят от установки электродов, вследствие относительно небольшой зоны влияния конденсатора. Для того чтобы получить точные данные о содержании влаги, необходимо выполнить тарировку для каждого зонда и каждого вида почвы.

### 15.7      **Методы дистанционного зондирования**

Метод дистанционного зондирования является единственным методом, который дает возможность выполнить измерения, содержащие суммарную по площади информацию о содержании влаги. Принципы, особенности и применение этого еще не полностью разработанного подхода кратко описывается в настоящем Руководстве. Более детальное и полное описание представлено Шмутге в *Hydrological Forecasting* [4] (Гидрологическое прогнозирование).

Большинство методов дистанционного зондирования почвенной влаги основаны на некоторой взаимосвязи между содержанием почвенной влаги и других свойствах почвы, например диэлектрической постоянной, которую можно

контролировать при помощи излучаемой или отражаемой от почвы электромагнитной радиации. В принципе, может использоваться весь спектр электромагнитного излучения. Поскольку большинство дистанционных устройств работают с самолетов или спутников, то недостаточная атмосферная проводимость отраженных длин волн в диапазоне Х-лучей, а также некоторые зоны в дальнем и среднем инфракрасном диапазоне, являются неприемлемыми.

Для площадного измерения содержания влаги особенно эффективной является микроволновая радиация с длиной волны от 50 до 500 мм. В связи с тем, что она имеет минимальное атмосферное ослабление, а также потому, что существует большая разница между диэлектрическими постоянными воды и сухой почвы, которая приводит к высокой чувствительности в отношении воды (раздел 15.6).

Используется пассивная (радиометр) и активная (радиолокация) микроволновая радиация. При пассивном микроволновом методе, применяется радиометр для измерения теплового микроволнового излучения от земли. Интенсивность этой радиации пропорциональна так называемой температурной яркости, которая является производной от поверхностной температуры и излучательной способности. Последняя зависит от диэлектрической постоянной, и таким образом — от содержания влаги.

При методе активной микроволновой радиации (радиолокации) используется искусственный источник радиации — излучатель — и измеряется интенсивность радиации, отраженной от почвы. Отражательная способность почвы, которая, подобно излучательной способности, зависит от диэлектрической постоянной, используется к тому же для определения площадного содержания почвенной влаги.

Определенное преимущество активного, по сравнению с пассивным микроволновым дистанционным устройством, заключается в его более высоком пространственном разрешении, поскольку поверхность земли может быть отсканирована лучом радиации с ограниченным углом. При пассивном микроволновом устройстве, пространственное разрешение ограничено соотношением длины волны и протяженности наблюдения к размеру антенны. Для последнего лучшее разрешение может быть получено только путем снижения длины волны, в результате чего уменьшается глубина зондирования почвы, или путем снижения высоты полета, что приводит к большему числу полетов.

Два важных фактора, которые, кроме влажности почвы, влияют на излучательную и отражательную способности почвы — шероховатость и растительность. Хотя эти факторы могут быть определены при помощи относительно простых линейных регрессионных моделей, которые включают эмпирические параметры шероховатости и содержания влаги в растительности, они снижают чувствительность метода из-за увеличения относительного фонового излучения.

15.8        **Тензиометрический метод**

[C62]

Тензиометр состоит из пористого стержня или чашки (обычно керамической), соединенных трубкой с устройством для измерения давления. Система заполняется водой, и вода в стержне или чашке приходит в равновесие с влагой в окружающей почве. Вода вытекает из стержня по мере высыхания почвы и повышения в ней давления или движется обратно в стержень по мере повышения влажности почвы и уменьшения давления. Эти изменения давления, или натяженности почвенной влаги, отмечаются измерительным устройством. Множественные тензиометры, помещенные на разных глубинах, позволяют рассчитать профиль влажности почвы.

Тензиометры обеспечивают данные потенциала почвенной влаги (компоненты давления). Для определения содержания влаги в почве с помощью тензиометра необходима тарировочная кривая, которая отражает связь между натяженностью и содержанием влаги в почве, но в полевых условиях рекомендуется использовать тарировочную кривую, полученную по данным весового метода измерения влажности почвы (раздел 15.2). Но даже в этом случае влажность почвы оценивается приблизительно, из-за существования гистерезиса между ветвями увлажнения и высыхания почвы кривой натяженности почвенной влаги. Метод измерения влажности почвы с помощью тензиометров ограничен диапазоном 0–0,8 бар (0–8 м отрицательного гидравлического напора). Поэтому он пригоден только для районов достаточного увлажнения.

Различные части тензиометра включают пористую чашку, подводящую трубку и/или главную трубку и датчик давления. Пористая чашка сделана из пористого, твердого материала (обычно керамики). Поры стенок чашки малы настолько, чтобы предотвратить проникновение воздуха. Полугибкая подводящая трубка и/или жесткая главная трубка обычно используются для соединения чашки тензиометра с датчиком давления.

Устройством измерения давления обычно является вакуумный манометр с трубкой Бурдона или ртутный манометр. К тензиометру может быть также подсоединен электрический преобразователь давления для сохранения непрерывной записи изменений натяжения. Поскольку система находится при частичном вакууме при ненасыщенной влагой почве, необходимо, чтобы все устройство или соединения были непроницаемы для воздуха. В полевых условиях вакуумные манометры с трубкой Бурдона более удобны, чем ртутные манометры, но они имеют более низкую точность. Электрический преобразователь давления является и удобным, и точным.

Время реакции тензиометра гораздо меньше с преобразователем давления, у которого небольшой объем емкости, чем с другими датчиками давления. Большие затраты могут быть снижены за счет использования только одного электрического преобразователя давления, подсоединенного к нескольким

тензиометрам через сканирующее устройство. Другое решение заключается в использовании аппаратуры, которая скато регистрирует давление в тензиометре методом иглы. Эта игла делает специальную отметку на трубке тензиометра только непосредственно в момент измерения. Один игольчатый аппарат может использоваться для регистрации данных нескольких тензиометров, помещенных в почву. Однако в отличие от систем, описанных выше, эти типы тензиометров не могут применяться для записи изменений потенциала давления.

Следует устанавливать тензиометры, предварительно откачив воду. Затем возможно удалить воздух, оставшийся внутри системы, при помощи вакуумного насоса. Тензиометры обычно вставляются в почву вертикально, в заранее подготовленные углубления такого же диаметра, как пористая чашка. Центр пористой чашки помещается на глубину, на которой требуется измерить давление.

На тензиометры оказывает влияние изменение температуры, которое вызывает термическое расширение или сжатие различных частей системы, и которое оказывает влияние на показания давления. В полевых условиях рекомендуется защищать от солнечной радиации тензиометры, которые находятся над поверхностью земли, для снижения этого влияния. Таким же образом тензиометры, используемые зимой, должны быть защищены от возможного повреждения в результате замерзания трубы с водой и датчика давления. Необходимо периодически очищать тензиометры, удаляя из системы накапливающийся воздух.

Показания тензиометра указывают давление в пористой чашке минус разница давления, вызываемого столбом воды между датчиком давления и пористой чашкой. Таким образом, потенциал давления почвенной влаги на глубине чашки — это показания датчика давления плюс давление этого столба воды. Если давление выражается с точки зрения всасывания, т. е. атмосферное давление минус давление в манометре, тогда потенциал давления почвы равен показанию датчика минус разница давления, вызванная столбом воды в трубке. Исправление потенциала давления почвы может производиться непосредственно в системе преобразования давления.

Трудно определить точность измерения тензиометром потенциала давления почвенной влаги. На точность измерения оказывают влияние температура, точность датчика давления и объем воздуха внутри системы. Кроме того, время реакции тензиометра может вызвать ошибочные измерения при очень быстром изменении во времени потенциала почвенной влаги. В этом случае не может быть достигнуто равновесие между водой в почве и водой в тензиометре. Недавние исследования показали, что полупроницаемые пластиковые стержни (чашки) обеспечивают более быструю реакцию, чем керамические[5].

Из всех приборов для измерения почвенной влаги, тензиометр отличается наибольшей простотой в отношении установки и снятия отсчетов. Однако тензиометры не приспособлены для установки на глубину более трех метров.

При нормальном атмосферном давлении этот метод ограничен в диапазоне потенциала давления ниже почти -85 кПа. Тензиометрам требуется частое обслуживание для получения надежных измерений в полевых условиях.

### Список литературы

1. World Meteorological Organization, 1992: *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 35, WMO-No. 749, Geneva.
2. Greacen, E. L. (ed.), 1981: *Soil Water Assessment by the Neutron Method* CSIRO. Special publication, Melbourne.
3. Topp, G. C., Davis, J. L. and Annan, A. P., 1980: Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, Vol. 16 No. 3, pp. 574-582.
4. Schmugge, T. J., 1985: Remote sensing of soil moisture. In: *Hydrological Forecasting* (M. G. Anderson and T. P. Burt, eds.), John Wiley, New York, pp. 101-124.
5. Klute, A. (ed.), 1986: *Methods of Soil Analysis*. Part 1: Physical and mineralogical methods. Second edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.



## ГЛАВА 16

### ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

#### 16.1       **Общие положения**

[E65]

Колебания уровня подземных вод отражают изменения запасов подземных вод в водоносных слоях. Можно выделить два главных вида колебаний: долговременные, обусловленные, например, сезонными колебаниями естественного питания и непрерывной усиленной откачкой; и кратковременные, вызываемые, например: периодической откачкой, приливными явлениями или изменениями атмосферного давления. Вследствие того, что уровни грунтовых вод обычно медленно реагируют на внешние изменения, для задач, стоящих перед большинством государственных сетей, большей частью не требуется проведение непрерывных измерений. Вполне достаточно проводить систематические наблюдения через фиксированные интервалы времени. Там, где по каким-либо причинам происходят быстрые колебания уровня, желательно организовать непрерывные наблюдения, по крайней мере до тех пор пока не будут установлены причины таких колебаний.

Исследования подземных вод можно разделить на три основные стадии:

- a) разведка: с целью предварительной оценки водных ресурсов;
- b) общие исследования: сбор сведений, необходимых для планирования развития городского промышленного строительства и сельского хозяйства;
- c) интенсивное изучение водоносного горизонта (горизонтов): этот вид исследований требует наибольших затрат и осуществляется в районах интенсивного развития в настоящее время или в перспективе.

На каждой стадии исследования подземных вод получают следующие сведения:

- a) пространственные и временные колебания уровней подземных вод, обусловленные естественными и антропогенными факторами;
- b) гидравлические постоянные водоносных горизонтов;
- c) геометрические характеристики водоносных горизонтов;
- d) естественное пополнение и сток;
- e) взаимосвязь с речными водами и искусственный водообмен;
- f) качество воды.

Сведения об уровнях подземных вод и качестве воды получают на основании измерений в наблюдательных скважинах и анализов проб подземных вод. Скважины для наблюдений за подземными водами или специально выбираются из существующих в данном районе, или бурятся и оборудуются специально для изучения условий подземных вод в данном районе на выбранном водоносном горизонте. Бурение наблюдательных скважин составляет основную статью затрат в исследованиях подземных вод, поэтому следует тщательно обследовать существующие скважины, и, по возможности, использовать их для наблюдательной сети.

## 16.2 Установка наблюдательных скважин

С давних времен в водоносных образованиях выкапывались колодцы. Существующие колодцы могут использоваться в качестве наблюдательных скважин за уровнем стояния подземных вод, если глубина воды в колодце превышает максимальные сезонные колебания уровня подземных вод, и известна геологическая структура местности. Следует обследовать существующие колодцы и установить, какие из них могут использоваться как наблюдательные скважины. Существующие скважины для откачки воды также могут быть включены в наблюдательную сеть, если кольцеобразный зазор между наружными обсадными трубами и трубой насоса оказывается достаточным для опускания измерительной ленты или троса при определении уровня стояния воды. Если насосная скважина используется в качестве наблюдательной, то уровень воды в ней должен измеряться после того, как насос будет отключен на сравнительно длительное время, достаточное для восстановления уровня воды в ней до естественного состояния. Отвод воды в окрестности скважины также должен прерываться на достаточно длинный период времени, чтобы конус депрессии, вызванный откачкой воды вблизи скважины, мог восстановиться. Бурение новых скважин связано с дополнительными затратами, поэтому необходимо очень тщательно планировать наблюдательную сеть.

Если на каком-либо водоносном слое, не имеющем связи со слоями, расположенным на других отметках, уже действуют несколько скважин по откачке воды, предпочтение следует отдавать установке специальной наблюдательной скважины, расположенной достаточно далеко от существующих, которые могут оказывать на нее влияние.

Основное преимущество колодцев заключается в том, что они могут сооружаться вручную местными рабочими. Обычно колодцы имеют глубину от 3 до 15 м, но глубина колодцев может достигать 50 м и более. Выкопанные колодцы облицовываются камнем, кирпичом или бетонными блоками. Для того чтобы обеспечить поступление воды из водоносного слоя, в стенах оставляют открытыми несколько отверстий и отбивают внутренние углы блоков или кирпичей.

При выемке грунта ниже отметки воды желательно применять насос, чтобы предотвратить оползание стенок под действием воды. При отсутствии

насоса, производительность которого соответствует расходу поступающей воды, можно продолжать углубление колодца с помощью буровых установок. Технология выемки грунта до уровня вод с последующим бурением широко практикуется в различных частях света. В окончательном виде скважина должна иметь защиту от дождя и поступления поверхностных вод, которые могут загрязнять воды в скважине, и, следовательно, в водоносном слое. Кирпичная кладка должна иметь высоту не менее 0,5 м над поверхностью земли. В целях безопасности на оголовке скважины устанавливается водонепроницаемая крышка с открывающейся дверкой. Близи верхней крышки должна отчетливо различаться отметка начала отсчета (привязанная к общей системе отсчетов), от которой будет измеряться расстояние до уровня воды.

Если уровень воды не опускается ниже 5–15 м от поверхности земли, наблюдательная скважина сооружается, как правило, с помощью ручного бурения. Ручные буры могут применяться для сооружения скважин диаметром 50–200 мм в глинах и супесях некоторых видов, которые не оседают без креплений. При бурении скважины ниже отметки грунтовых вод в несвязанных песках, обсадную трубу можно опустить на дно сделанной выемки, а далее продолжать бурение буром меньшего диаметра. Чтобы скважина была глубже, вынутый грунт можно удалять черпаком.

В районах с подробными сведениями о геологической структуре грунта, состоящего из несвязанных песков, осадочных отложений или глин, могут сооружаться наблюдательные скважины малого диаметра глубиной до 10 м. Эти скважины бурятся вращающейся насадкой, закрепленной на нижнем конце стальной трубы, которая составляется из наглоухо соединенных секций. Причем одной из секций является сетка (фильтр), представляющая собой просверленную трубу, упакованную в проволочную сетку, защищенную дырчатым латунным листом. Пробуренные скважины диаметром 35–50 мм отвечают требованиям наблюдательных скважин.

Для того чтобы проникнуть в глубокие водоносные слои, скважины бурятся с помощью вращательного бурового или ударного станка. Обычно наблюдательные скважины устанавливаются с внутренним диаметром 50–150 мм, так как бурение скважин малого диаметра дешевле. Для этих целей часто используется гидравлический буровой станок с диаметрами труб от 115 до 165 мм. Бурение с помощью вращательного бурового станка является более быстрым, чем ударный метод, в осадочных образованиях, содержащих булыжники, сланцы и гальку. Так как кусочки скальной породы удаляются из скважины постоянной струей буровой жидкости, то, по мере углубления в грунт, через определенные интервалы проходки, берутся пробы удаляемой породы. Это осуществляется путем бурения до самого дна пробы, буровая жидкость круговым движением вымывает все кусочки, и бурение повторяется через определенные интервалы с удалением кусочков из

пробы. Опытные гидрогеологи и бурильщики при помощи тщательного наблюдения за скоростью и эффективностью бурения могут обнаруживать изменения в характеристиках породы и определять необходимость дополнительных проб.

Ударный метод бурения скважин предпочтительней в трещиноватых скальных или других породах с большой проницаемостью. Обычно диаметр скважин, прокладываемых ударным методом, колеблется от 100 до 200 мм, таким образом после установки облицовочных стенок, наблюдательная скважина имеет диаметр 50–150 мм. При ударном методе также осуществляется отбор проб вынутого грунта, на основании которого может быть составлено геологическое описание разреза скважины.

Во многих случаях исследуемый водоносный горизонт отделяется от других водоносных горизонтов слоями менее проницаемых пород. Места контактов облицовочных стенок с проницаемыми верхними горизонтами должны отделяться от исследуемого водоносного слоя средствами, известными как герметизация (или цементирование). Скрепляющий раствор может быть глинистым или смесью цемента с водой в такой пропорции, которая позволяет накачку через трубы. Цементирование или герметизация обсадки в наблюдательных скважинах выполняется в следующих целях:

- a) предотвратить просачивание загрязняющих поверхностных вод в водоносный слой, которое может происходить по внешней стороне облицовочных труб;
- b) изолировать исследуемый водоносный горизонт от вод, которые могут поступать из вышерасположенных водосодержащих образований;
- c) уплотнить пригонку облицовочных стенок в скважине, которая имеет больший диаметр, чем облицовка.

Верхние три метра скважины обычно обкладываются водонепроницаемым материалом. Для изоляции верхних водоносных слоев непроницаемый материал должен укладываться на три метра выше водоупорного горизонта между водоносными слоями.

В плотных скальных породах наблюдательная скважина может устанавливаться без облицовки. На рисунке 16.1 показана полностью оборудованная скважина для таких условий. Пробуренное отверстие следует очистить от мелких обломков и отходов бурения. Очистка скважины может осуществляться откачкой или вычерпыванием воды, пока вода не станет чистой.

Облицовочные стенки устанавливаются в скважинах, пробуренных в рыхлых отложениях. Основные особенности установки облицовочных стенок показаны на рисунке 16.2. Следует отметить, что:

- a) обычный диаметр облицовочных труб в наблюдательных скважинах — 50 мм;

- b) на дне скважины устанавливается пустая секция, закрытая с нижнего конца; длина этой секции должна быть не менее 3 м, она служит для накопления отложений, которые могут поступать из сетчатой секции облицовки; пустая секция называется отстойником;
- c) секция в виде сетки, называемая фильтром или решеткой, прикрепляется к отстойнику и обеспечивает свободный обмен водой между водоносным слоем и скважиной; решетка в облицовке наблюдательной скважины имеет длину около 2 м;
- d) пустая секция облицовки на верхнем конце скважины должна иметь достаточную длину, чтобы быть выше поверхности земли примерно на 1 м, иметь место для нанесения постоянной отметки начала отсчета при выполнении программы наблюдений;
- e) точное положение сетчатой секции в скважине должно обеспечиваться центрирующими крестовинами;
- f) если водоносный пласт представлен мелким или осадочным песком, то необходим защищающий от засыпания экран, который устраивается из необработанного гравийного материала, засыпаемого в зазор между фильтрующей секцией и стенками скважины; при диаметре скважины 150 мм и диаметре облицовочной трубы 50 мм обычная толщина гравийного экрана составляет 45 мм, но не должна быть меньше 30 мм, чаще всего материалом для экрана служит раздробленный базальт с просеянными частицами от 1 до 4 мм; гравий засыпается через специальную трубу малого диаметра, вводимую между стенкой скважины и облицовочной трубой; количество засыпаемого гравия должно быть достаточным для заполнения зазора между стенками скважины и облицовочной трубой от дна до высоты и должен составлять не менее 50 см над верхним концом фильтрующей секции;
- g) на поверхности земли вокруг скважины делается выемка размерами 80 × 80 см, которая конусообразно сужается до размеров 40 × 40 см на глубине 1 м; через эту выемку вокруг облицовочной трубы укладывается глиняный плотный затвор на глубину до 2 м, который должен предохранять от просачивания загрязняющих поверхностных вод; верхняя часть затвора делается из бетона, который в виде конуса укладывается вокруг облицовочной трубы для отвода осадков от скважины;
- h) оголовок трубы, выступающий из бетонного затвора, должен закрываться для безопасности. На рисунке 16.1 показаны детали установки скважины. Верхняя 50-миллиметровая пробка завинчивается в трубу специальным ключом, а дополнительная железная пробка, внутри трубы, может выниматься сильным магнитом.

Часть трубы, выступающей над поверхностью земли, должна быть окрашена в яркий цвет, чтобы быть легко заметной на расстоянии. Глубина стояния уровня воды измеряется от конца трубы (после снятия пробок). Эта относительная отметка должна иметь привязку к общей системе отсчета, принятой для данного района.

Наблюдательные скважины должны обслуживаться организациями, ответственными за мониторинг и исследование подземных вод. Место вокруг

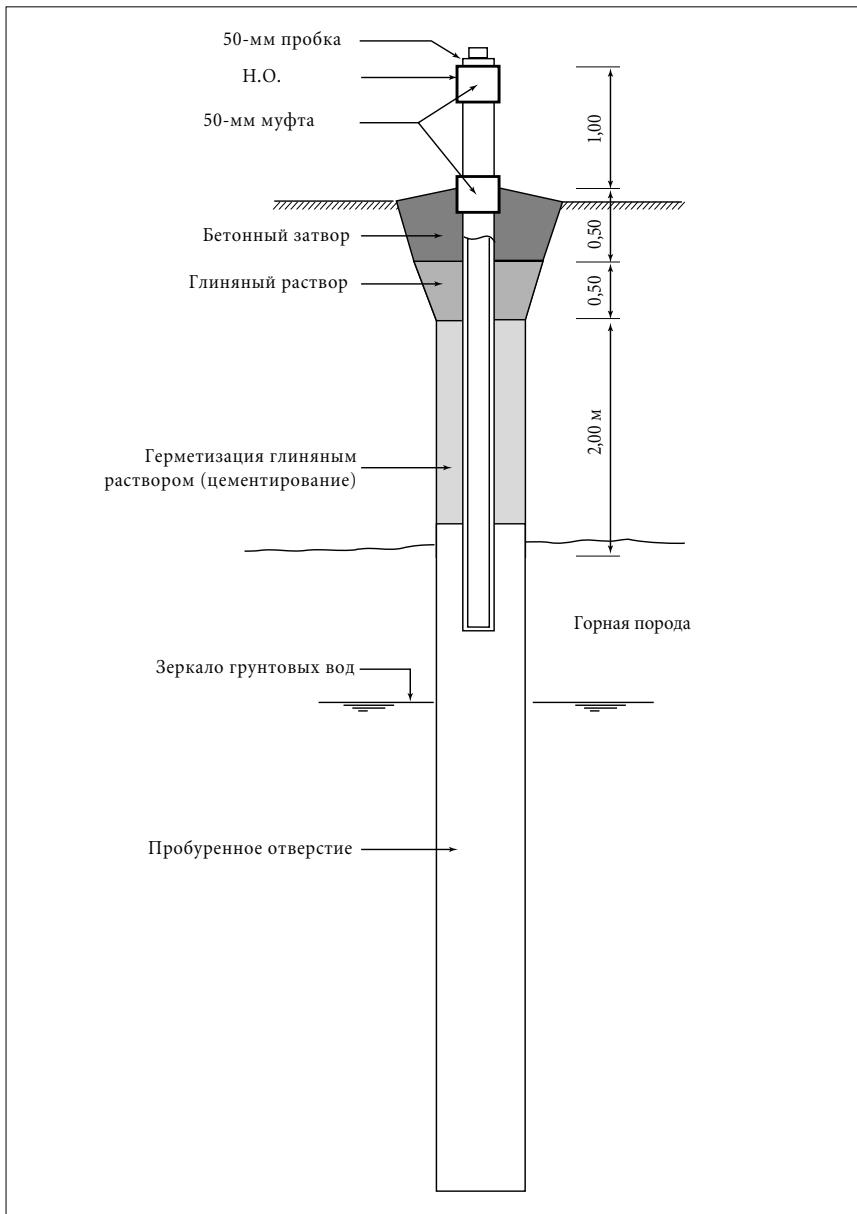


Рисунок 16.1 — Наблюдательная скважина в горной породе

скважины должно быть свободным от растений и обломков. На бетонном покрытии может быть укреплен латунный диск с указанием отметки наблюдательной скважины и наименованием организации. Этот латунный диск может использоваться в качестве репера для служебных целей. Если выступающую часть облицовочной трубы требуется заменить из-за повреждения, то на вновь установленной трубе необходимо определить новую отметку начала отсчета. Для скважин, которые не откачиваются, но используются в качестве наблюдательных, все работы по эксплуатации и определению отметки начала отсчета следует выполнять по тем же правилам, по которым осуществляется эксплуатация специально установленных наблюдательных скважин.

В исследуемом районе может существовать несколько водоносных пластов или водоносных прослоек на различных глубинах, ниже поверхности земли, разделенных водоупорами различной толщины. В таких случаях полезно придерживаться следующих правил (рисунок 16.3):

- a) прежде всего должна быть пробурена скважина большого диаметра до самого нижнего водоносного горизонта;
- b) наблюдательные скважины меньшего диаметра с соответствующим экранированием устанавливаются до самого нижнего водоносного слоя;
- c) внешняя обсадная труба поднимается до водоупора, расположенного выше этого водоносного пласта; верх нижнего водоносного горизонта цементируется раствором цемента или другого соответствующего вещества;
- d) затем устанавливается наблюдательная скважина малого диаметра до следующего водоносного пласта, которая изолируется цементированием от водоносного слоя, залегающего выше;
- e) пункты (c) и (d) повторяются при проходке для каждого нового водоносного горизонта.

В этом случае изоляция каждого из водоносных пластов должна осуществляться с большой тщательностью, чтобы предотвратить водообмен между водоносными слоями с различными химическими свойствами или потерю артезианского давления. Если геологическое строение района хорошо известно, и глубина каждого водоносного пласта может быть определена, то желательно устанавливать скважину на каждом водоносном горизонте. Такие буровые скважины находятся друг от друга на расстоянии всего лишь нескольких метров. Этот метод может оказаться более экономичным.

Уход за насосными скважинами, включенными в наблюдательную сеть, должен осуществляться владельцами скважин.

### 16.3        **Испытание наблюдательных скважин**

Реакцию наблюдательной скважины на изменения и колебания уровня воды в водоносном горизонте следует определить сразу же после окончания установки

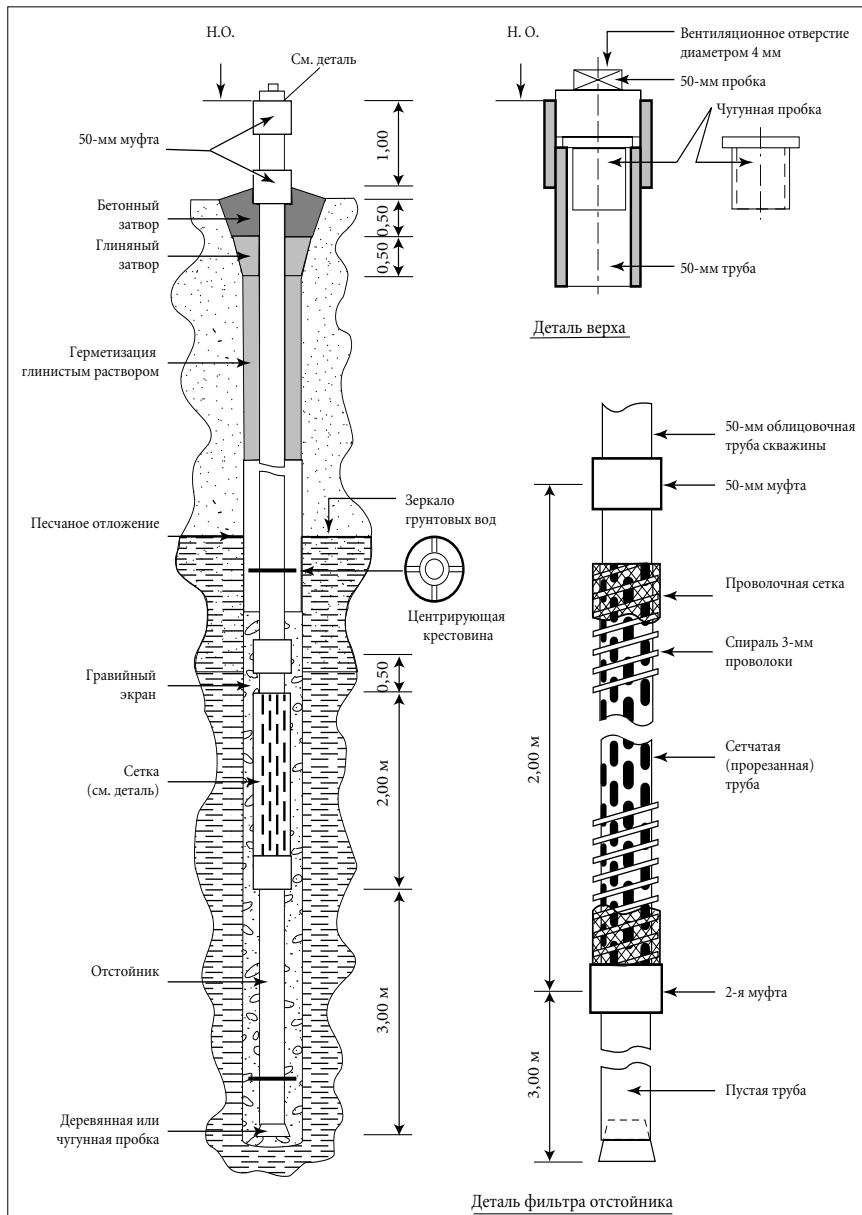


Рисунок 16.2 — Наблюдательная скважина в песчаных отложениях

скважины. Простой метод испытания наблюдательных скважин малого диаметра состоит в наблюдении за утечкой в зону обмена, при этом известный объем воды нагнетается в скважину, и измеряется постепенное падение уровня воды. Первонаучальный подъем воды должен упасть до 5 мм исходного уровня в течение трех часов. При слишком медленном падении уровня необходимо предпринять очистку скважины, удалить грязь с фильтра или прорезей, удалить мелкий материал из экранирующей обкладки вокруг скважины. Очистка облегчается, если усилить движение подземных вод к скважине или от нее.

После очистки скважины необходимо измерить глубину скважины от начала отсчета до дна. Полученная величина при сравнении с общей длиной облицовки позволяет определить количество отложений в отстойнике. Периодические испытания помогают контролировать работу фильтра скважины. Если в результате измерения будет установлено, что отложения полностью заполнили секцию отстойника и начали заполнять секцию фильтра, то уровень воды в скважине не соответствует уровню воды в водоносном пласте. Показания такой скважины следует считать сомнительными.

Прежде чем устанавливать облицовку в глубокие, открытые скважины малого диаметра, строятся геофизические разрезы (на основании измерений с помощью электрических приборов). Такие разрезы позволяют определить изменения в литологическом строении и базируются на измерениях удельного сопротивления и самопотенциала (спонтанного потенциала). Разрез, построенный по изменению интенсивности естественного гамма-излучения, может использоваться для контроля залегания глиняных водоупоров, выше исследуемого водоносного пласта. Качество воды в скважине определяется путем отбора проб воды, которые берутся после процесса исследования скважины.

#### 16.4 Закупорка и заполнение заброшенных скважин

Наблюдательные и насосные скважины перестают действовать по следующим причинам:

- a) несостоятельность скважины в отношении количества и качества поступающей воды;
- b) установка новой более глубокой скважины взамен старой;
- c) окончание использования наблюдательной скважины в исследовательских целях.

Во всех этих случаях заброшенные скважины подлежат закрытию или выведению из строя таким образом, чтобы они не могли служить каналами для водообмена между водоносными слоями, который может привести к ухудшению качества воды в пластах, пересекаемых скважинами.

Заполнение и закупорка заброшенных скважин должна выполняться следующим образом:

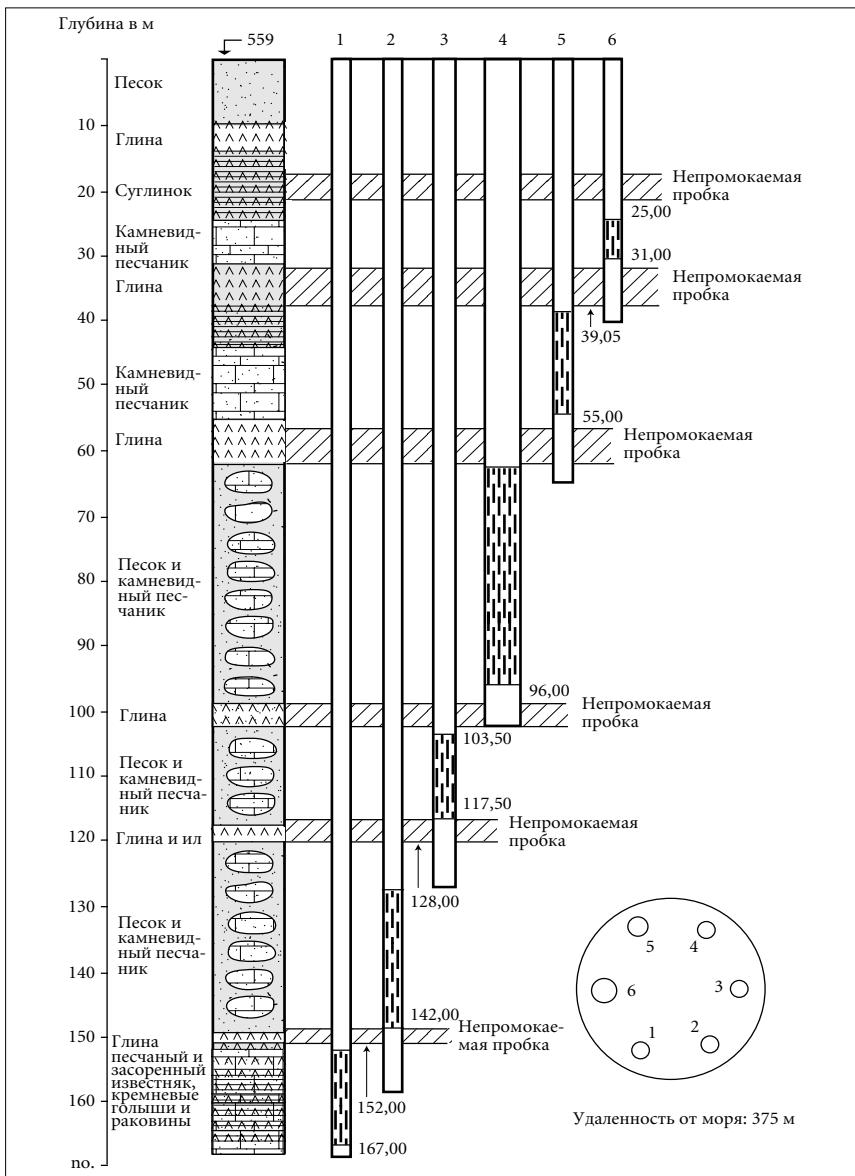


Рисунок 16.3 — Схематическое изображение поперечного разреза наблюдательных скважин, устанавливаемых в нескольких водоносных горизонтах

- a) если не требуется непроницаемый материал, то скважина заполняется песком или другим неорганическим материалом;
- b) для предотвращения водообмена между водоносными горизонтами или потери артезианского давления, скважина заполняется водонепроницаемым неорганическим материалом. Этим запирающим материалом скважина заполняется не менее чем на 3 м вверх и вниз от линии контакта с водоносным горизонтом для того, чтобы предотвратить поступление воды из водоносного пласта;
- c) если границы залегания различных образований неизвестны, то скважина заполняется чередующимися слоями водонепроницаемых и проницаемых пород;
- d) мелкозернистый материал не следует использовать в качестве заполнителя для трещиноватых скальных пород; в этих случаях лучше использовать цементный или бетонный жидкие растворы. Если скальные породы тянутся на большую глубину, то скважину следует заполнять чередующимися слоями: необработанный заполнитель и цементный раствор;
- e) во всех случаях верхние пять метров скважины должны заполняться неорганическим непроницаемым материалом.

## 16.5 Приборы и методы наблюдений

[C65]

Прямые измерения уровня подземных вод в наблюдательных скважинах можно проводить либо ручными, либо автоматическими приборами с непрерывной записью наблюдений. В приведенных ниже описаниях приборов излагаются принципы измерений уровня подземных вод. Описания некоторых приборов даются в приведенном списке литературы.

### 16.5.1 Ручные приборы

Наиболее распространенный способ ручного измерения уровня подземных вод заключается в том, что от определенной точки на поверхности земли, обычно расположенной на оголовке скважины, опускают груз (подвешенный, например, на размеченном гибком стальном тросе или пластмассовой ленте) до произвольной точки, ниже уровня подземных вод в скважине. Подняв трос на поверхность, определяют положение уровня подземных вод, вычитая длину погруженвшейся в воду части троса из общей длины троса, опущенного в скважину. Длину смоченной части троса можно определять более точно, если перед каждым измерением натирать нижнюю часть троса мелом. Для этой же цели применяли пасты, меняющие цвет при соприкосновении с водой, но они содержат ядовитые вещества, и поэтому применения их следует избегать. Необходимо делать несколько пробных измерений для того, чтобы заранее (до производства отсчетов) знать приблизительную глубину до поверхности воды. По мере увеличения глубины залегания

воды, длина измерительного троса увеличивается, и, в конце концов, его вес и громоздкость всего оборудования становится труднопреодолимой помехой при наблюдениях. Глубины до 50 м можно легко измерять, но глубины до и свыше 100 м — более трудно. Для таких глубин следует применять узкие стальные или легкие пластмассовые ленты. Глубину до поверхности воды можно измерить с точностью до нескольких миллиметров, но точность измерения различными методами обычно зависит от этой глубины.

Разработаны приборы, основанные на принципе инерции: груз, прикрепленный к концу троса, падает с постоянной скоростью под влиянием силы тяжести, при этом трос сматывается с барабана переносного прибора, установленного на поверхности земли. При ударе груза о поверхность воды, автоматически срабатывает тормозной механизм, и дальнейшее падение прекращается. Длина спущенного троса, соответствующая глубине залегания воды, отмечается на счетчике оборотов. Этот прибор предназначен для измерения глубины с точностью до 1 см, но опытные наблюдатели добиваются точности до 0,5 см.

В системе с двойным электродом на конце кабеля в одном корпусе помещают два небольших электрода длиной от 10 до 20 см. Эта система также включает аккумуляторную батарею и электросчетчик, который включается, когда электроды погружаются в воду. Электрический кабель должен обладать ничтожным растяжением, причем пластмассовая изоляция для него предпочтительнее резиновой. Кабель размечается с помощью съемных меток, прикрепляемых к нему через каждые 1 или 2 м. Точная глубина до поверхности воды измеряется стальной рулеткой до ближайшей метки на кабеле. Измерения глубин примерно до 150 м проводятся без труда, возможны измерения и до 300 м и даже более. Пределы измеряемых глубин зависят от длины электрического кабеля, устройства электрической цепи, веса оборудования (в частности, веса спускаемого в скважину кабеля) и усилия, прилагаемого для спуска и подъема кабеля. Точность измерения определяется опытом наблюдателя и точностью разметки кабеля. Размещение меток на кабеле и электрическая цепь должны проверяться через регулярные интервалы времени, желательно до и после определенной серии наблюдений. Применение электрических измерительных устройств особенно выгодно там, где требуются повторные измерения уровня воды через короткие интервалы времени во время опытных откачек.

В очень глубоких скважинах, требующих длину кабеля порядка 500 м, точность измерения составляет примерно  $\pm 15$  см. Однако при измерениях изменений уровня воды можно получить точность, близкую к миллиметру, если опускаемый кабель имеет датчик, реагирующий на уровень воды.

Для ручных измерительных устройств можно использовать электрохимический эффект, вызываемый двумя разнородными металлами, погруженными в воду, причем в этом случае не требуется батарея для питания. В большинстве

случаев можно возбудить ощутимый электрический ток, погрузив в подземные воды либо два электрода (например магниевый и медный), смонтированные в одном корпусе, либо один электрод (магниевый) со стальным заземлительным стержнем на поверхности земли. Вследствие слабого напряжения возникающего тока в качестве индикатора обычно используют микроамперметр. Система с одним электродом может быть выполнена в виде размеченного стального троса, проводящего электрический ток, или в виде ленты, покрытой пластмассой и соединенной с электрическим одножильным кабелем. Точность измерений зависит от точности разметки троса или ленты, но вообще, легко выполнимы отсчеты с точностью до 0,5 см.

Можно поместить в наблюдательную скважину поплавок и соединить его тросом, перекинутым через блок, с противовесом; изменения уровня воды определяются по изменениям положения противовеса или метки на тросе. К блоку можно присоединить шкалу для непосредственных отсчетов уровня. Этот прибор пригоден в основном для измерений колебаний уровня с незначительной амплитудой.

При изливании подземных вод на поверхность земли прежде, чем приступить к измерениям, следует наложить на оголовок скважины герметичные уплотнения. Давление (или эквивалентный уровень воды) можно измерять манометром либо визуально, либо присоединив к манометру самописец; где это окажется целесообразным, можно измерять уровень воды в узкой расширительной трубке, изготовленной из стекла или пластика, установленной непосредственно над оголовком скважины. Если ожидаются морозы, то в воду следует налить масло или антифриз.

Все ручные измерительные приборы требуют бережного обращения и постоянного ухода, иначе их эффективность будет значительно снижена. Ручные измерения уровня подземных вод требуют от наблюдателя хорошей подготовки.

#### 16.5.2 *Автоматические самопишиущие приборы*

Существует много различных типов автоматически действующих самописцев уровня подземных вод непрерывного действия. Можно спроектировать самописец для индивидуальной установки, но все же главное внимание при проектировании следует уделять взаимозаменяемости приборов. Самописец должен быть портативным, легко устанавливаемым, он должен безотказно вести запись в широком диапазоне климатических условий и работать автономно в течение различных периодов времени. Необходимо обеспечить возможность вести запись колебаний уровня с различной скоростью с помощью съемных механизмов для записи по шкале времени и шкале уровней. Таким образом, один и тот же основной прибор, при помощи минимального количества вспомогательного оборудования, может быть использован в течение различных периодов времени, на разных наблюдательных скважинах, в пределах большой амплитуды колебаний уровня.

Опыт показал, что наиболее удобным из всех существующих непрерывно действующих самописцев уровня является самописец, приводимый в действие поплавком. У этого самописца график колебаний уровня вычерчивается на ленте, укрепленной на горизонтальном или вертикальном барабане, либо на перематывающейся ленте. Для получения наилучших результатов при наибольшей чувствительности, диаметр поплавка должен быть возможно большим, а вес передающего троса и противовеса возможно меньшим. Как правило, диаметр поплавка должен быть не меньше приблизительно 12 см, хотя некоторые модификации отдельных типов самописцев допускают применение поплавков меньшего диаметра. Барабан или перо приводится в движение пружинным или электрическим часовым механизмом. Запись производится пером или иглой на специально обработанной бумаге. Используя съемные механизмы, можно изменять соотношение между скоростью вращения барабана и колебаниями уровня воды; масштаб записи колебаний уровня подземных вод может быть от 1 : 1 до 1 : 20. Скорость записи у приборов различных типов различна, но обычно записывающие механизмы устроены таким образом, что полная длина ленты соответствует периоду в 1, 2, 3, 4, 5, 16 или 32-м суткам. Некоторые самописцы с перематывающимися лентами могут работать непрерывно свыше 6 месяцев.

Если поплавочные самописцы снабжены размеченным тросом, то при каждой смене лент следует производить непосредственный отсчет глубины (или относительной глубины) уровня воды и отмечать его в начале и конце графика колебаний уровня. Эти отсчеты следует проверять через регулярные промежутки времени по ручным приборам. Точность определения промежуточных уровней на ленте зависит в первую очередь, от отношения скорости вращения барабана самописца к величине колебаний уровня подземных вод и связана, таким образом, с передаточным числом самописца.

Непрерывные измерения уровня подземных вод в скважинах малого диаметра представляют собой трудную проблему, потому что по мере уменьшения диаметра поплавка, резко уменьшается чувствительность всего поплавкового механизма. Для слежения за изменениями уровня воды были разработаны миниатюрные поплавки и электрозонды малого диаметра. Их движущая сила обычно обеспечивается пружинным или электрическим сервомеханизмом, установленным на поверхности земли среди наземного оборудования. Миниатюрный поплавок подвешивается в скважине на тросе, который удерживается барабаном с приводом, и имеет связь с блоком самописца уровня воды. В состоянии равновесия сервометр выключен. Снижение уровня воды в скважине вызывает перемещение поплавка, которое приводит в движение барабан, и это незначительное перемещение барабана вызывает электрический контакт, который включает малый мотор. Барабан, приводимый в движение этим мотором, освобождает трос до восстановления равновесия и отключает мотор.

При подъеме уровня воды в скважине воздействие на барабан осуществляется в обратном направлении — электроконтакт включает малый мотор, приводя его в движение так, что трос наматывается на барабан до тех пор, пока новое равновесие не будет достигнуто. Эти перемещения троса фиксируются пером самописца, и таким образом на ленте самописца получается запись колебаний уровня воды в скважине. Сервомотор, который вращает барабан с тросом, может приводиться в действие и зондом, реагирующим на уровень воды в скважине. Такое приспособление состоит из датчика, подвешенного на электрическом кабеле, который наматывается на шкив самописца уровня. Колебания уровня воды вызывают изменения давления, которое передается мембраной переключателю зонда. Переключатель, подсоединеный в электрическую цепь, приводит в действие мотор, и зонд опускается или поднимается пока не достигнет нейтрального положения при новом уровне воды.

Трение поплавка и соединительных приспособлений об облицовочные стенки скважины существенно ухудшает точность измерений с помощью самописца уровня, особенно в глубоких скважинах. Причем наибольшую погрешность вызывает торможение подвесного троса. Для того чтобы уменьшить трение, применяются поплавки малого диаметра со скользящими роликами, укрепленными с двух сторон на поплавке. К значительному уменьшению трения приводят также круглые диски (крестовины) с маленькими роликами, которые укрепляются на кабеле через каждые 10 м и не позволяют ему касаться стенок облицовочной трубы, снижая таким образом трение. На рисунке 16.4 показаны некоторые детали таких приспособлений. Чувствительность самописцев уровня с поплавками, снабженными скользящими роликами, составляет 6 мм, но чувствительность переключающих механизмов к перемещению поплавка повышается не столь значительно. Точность устройства ухудшается при ослаблении батарей. Для устранения этого явления, следует менять батареи максимум через 60–90 дней работы прибора в обычных условиях.

Другим вариантом измерения уровня воды в скважине является электрозонд, который представляет собой электрод, подвешенный на кабеле в наблюдательной скважине на известном расстоянии над уровнем воды. Через определенные промежутки времени сервомеханизм приводит в движение электрозонд, который опускается и касается поверхности воды, посыпая электрический сигнал. В этот момент отмечается расстояние до уровня воды. Эта система может быть использована с различными системами записи.

Хотя эти приборы особенно ценны для применения в скважинах малого диаметра, они могут быть установлены в скважинах любого диаметра, превышающего рабочий диаметр зонда.

Для некоторых исследовательских проектов были сконструированы более сложные приборы для измерения колебаний уровня подземных вод, например:

емкостные электроздонды, преобразователи давления, тензиометры, отражатели звуковых и коротких волн. В настоящее время стоимость этих приборов относительно высока по сравнению со стоимостью поплавковых самописцев уровня, кроме того применение их ограничено, главным образом в отношении амплитуды колебаний уровня подземных вод, они также в большинстве случаев требуют высоквалифицированного обслуживания. Считается, что поплавковые системы самописцев более надежны и могут найти более широкое применение, чем любые другие системы, хотя развитие приборостроения в области датчиков, преобразователей и записывающих устройств в будущем может создать предпосылки для разработки новых приборов такого же или лучшего качества при сравнительно невысокой их стоимости.

Самописцы уровня воды с цифровой записью, используемые при измерении расхода воды на реках (раздел 10.2.2), могут быть легко приспособлены к измерению уровня подземных вод.

Автоматические самопишушие приборы требуют умелого и оперативного обслуживания, иначе записи погибнут. Несложный ремонт можно осуществлять на месте, но при более серьезных неполадках прибор следует заменить и отправить для ремонта в лабораторию или мастерские. Следует также принимать меры, необходимые для защиты таких приборов от экстремальных климатических условий, случайных или умышленных повреждений. Пружинные и электрические часовые механизмы чувствительны к воздействию повышенной влажности, поэтому необходима их тщательная вентиляция, а при определенных условиях — применение десикаторов.

#### 16.5.3 Устройства для отбора проб воды из безнасосных скважин

Простейшим прибором для отбора проб подземных вод является желонка, представляющая собой удлиненную трубку с шаровым клапаном на дне. Желонка подвешивается на тросе и опускается в скважину. Шаровой клапан пропускает воду в камеру желонки, а при подъеме удерживает воду в камере. Такое устройство позволяет брать пробы из самого верхнего слоя воды в скважине. Вода может входить в желонку и на более глубоких точках столба воды в скважине, но при подъеме может быть смешанной с водой верхнего слоя.

Для отбора проб с любой глубины ниже уровня воды были разработаны пробоотборники с пружинными затворами. Пробоотборник опускается на тросе на нужную глубину, измеряемую счетчиком. Во время опускания пробоотборник открыт с обоих концов, и вода свободно протекает через него. После того как нужная глубина достигнута, опускается груз, скользящий по тросу, который удаляет по пусковому устройству, закрывающему камеру пробоотборника. Затем пробоотборник поднимается на поверхность, и камера с пробой воды открывается нажатием пускового устройства.

16.5.4 *Регистраторы солености и температуры воды* [C67]

Электрическая проводимость воды возрастает с увеличением ее солености. Поэтому обычно содержание растворенных минеральных веществ определяют, измеряя электрическое сопротивление воды. Прибором для измерения сопротивления воды может служить очень простой переносной мост сопротивления, измеряющий в месте установки сопротивление пробы воды из скважины, отобранный насосом или пробоотборником.

Для измерения солености в определенной точке ниже отметки воды (например в фильтрующей секции скважины) или для построения химического разреза всего столба воды в скважине (например для изучения смешения морской и пресной вод) используется электрозонд для измерения солености. Он состоит из погружаемой ячейки с кабелем. Между двумя электродами, объединенными в одну погружаемую ячейку, проходит ток через слой измеряемой воды. Сопротивление воды измеряется реостатом с цифровым потенциометром, к которому присоединен конец кабеля.

Сопротивление воды изменяется с изменением ее температуры. Поэтому одновременно измеряется температура воды термистором, вмонтированным в погружаемую ячейку. Концентрация растворенных солей на различных уровнях в скважине рассчитывается с использованием тарировочной кривой, построенной по точкам измеренного сопротивления в стандартных растворах с известными концентрациями KCl. Сопротивление воды рассчитывается при температуре 25 °C по следующему уравнению:

$$R_{25} = (R_\Theta - r)(1 - 0,02 \Delta \Theta), \quad (16.1)$$

где  $R_{25}$  — сопротивление пробы при 25 °C;  $R_\Theta$  — сопротивление, показанное прибором при измеренной температуре 0 °C;  $r$  — сопротивление инструмента (элемент + кабель и т. п.);  $\Theta$  — измеренная температура, °C;  $\Delta = 25^\circ - \Theta$ .

16.6 **Мониторинг качества подземных вод** [E65]

Качество подземных вод постоянно меняется и ухудшается в результате человеческой деятельности. Локальными точечными источниками загрязнения являются: выгребные ямы и септические емкости, коммунальные стоки и сточные емкости, загрязнения с открытых свалок и со свалок с грунтовой засыпкой, стоки с животноводческих ферм, промышленные стоки, охлажденный возвратный сток в поглощающие скважины и утечки с танкеров или трубопроводов. На более значительных территориях может наблюдаться снижение качества подземных вод в результате возвратных вод с мелиорируемых полей, подпитки водоносных горизонтов обработанными сточными водами или загрязненными промышленными стоками, поступления в пресные водоносные горизонты приграничных морских вод или минерализованных вод из других водоносных горизонтов.

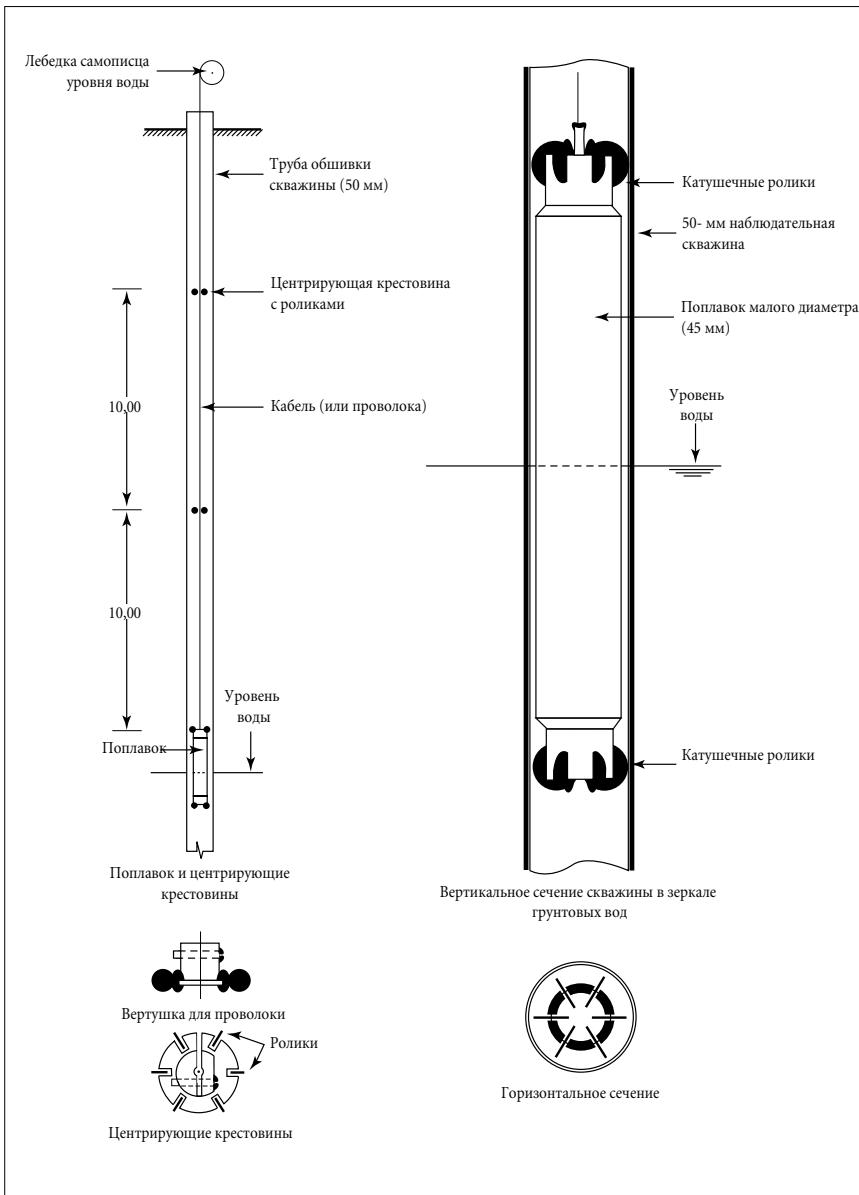


Рисунок 16.4 — Поплавок с катушечными роликами для скважин небольшого диаметра

Пробы воды могут отбираться как из безнасосных скважин, так и из скважин оборудованных насосом. Для отбора проб в безнасосных скважинах применяют портативные насосы. Если требуется произвести отбор пробы воды с определенной глубины, то в открытых скважинах можно использовать специальный пробоотборник. Однако такой пробоотборник должен иметь небольшой внешний диаметр, чтобы его можно было опускать в скважину. В некоторых случаях при отборе проб определенные слои в скважинах могут временно изолироваться с помощью механической закупорки или заполнения газом.

Отбор проб и определение уровня грунтовых вод в верхних насыщенных слоях, лежащих на менее проницаемых слоях зоны недостаточного насыщения, можно часто производить при помощи пьезометров. Пьезометры представляют собой специальные трубы, пористые у основания, которые вдавливаются или забиваются на необходимую глубину. Другим методом отбора проб из зоны недостаточного насыщения является вкалывание пористой керамической чашки в хорошем контакте с почвой или для обеспечения хорошего взаимодействия, засыпка у ложа чашки чистого песка, с подводящей вакуумной трубкой к дну чашки (раздел 15.4). Почвенная влага проникает в чашку в результате всасывания и поднимается в специальную бутылку для проб по вакуумной трубке. Когда подобное устройство установлено ниже уровня, из которого проба воды может подниматься за счет всасывания, то вода может всасываться через контрольный клапан из пористой камеры во вторую камеру, из которой она уже затем может быть поднята на поверхность путем закачки азота в эту камеру.

Основные переменные для определения качества поверхностных вод (раздел 17.5.2) также применимы для мониторинга качества подземных вод, за исключением мутности, которая обычно не представляет проблемы для подземных вод [1-7].

### Список литературы

1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Health Organization, 1978: *Water Quality Surveys: A Guide for the Collection and Interpretation of Water Quality Data*. Prepared by the IHD-WHO Working Group on Quality of Water for Unesco and WHO with assistance from UNEP.
2. U.S. Geological Survey, 1981: *National Handbook of Recommended Methods for Water-Data Acquisition*. Chapter 2: Groundwater, Reston, Virginia.
3. Everett, L. G., 1980: *Groundwater Monitoring*. General Electric, Schenectady, New York.
4. International Organization for Standardization, 1988: *Guidance on the Sampling of Groundwater*. ISO/TC147, SC6/WG4/N30, Geneva.
5. Energy, Mines and Resources Canada, 1985: *Uranium Tailings Sampling Manual*, Ottawa.

6. World Meteorological Organization, 1988: *Manual on Water Quality Monitoring — Planning and Implementation of Sampling and Field Testing*. Operational Hydrology Report No. 27, WMO-No. 680, Geneva.
7. World Meteorological Organization, 1989: *Management of Groundwater Observation Programmes*. Operational Hydrology Report No. 31, WMO-No. 705, Geneva.

## ГЛАВА 17

### КАЧЕСТВО ВОДЫ

#### 17.1       **Общие положения**

В данной главе рассматриваются основные аспекты отбора проб для определения качества воды и конкретные вопросы, связанные с отбором проб в реках, ручьях, озерах и водохранилищах. Специальные аспекты проблемы отбора проб для определения качества осадков и подземных вод рассматриваются соответственно в разделах 7.9 и 16.6. Более подробное описание этого вопроса можно найти в работах *BMO Manual on Water Quality Monitoring — Planning and Implementation of Sampling and Field Testing* [1] (Наставление по мониторингу качества воды — планирование и осуществление отбора проб и полевые исследования) и *GEMS/Water Operational Guide* [2] (Оперативное руководство по ГСМОС/Воде).

#### 17.2       **Методы отбора проб**

[E05]

Отбор проб представляет собой процесс взятия репрезентативного количества воды из реки, озера или колодца. Архивные данные не могут заменить уверенность, которую можно учитывать при определении репрезентативной пробы.

Методы отбора проб определяются рядом факторов, которые включают: материал отбираемой пробы, тип пробы и анализируемый параметр качества, который в свою очередь определяет применяемое оборудование и методы.

##### 17.2.1      **Виды проб**

###### 17.2.1.1     *Грейферные пробы*

Сбор грейферных проб является подходящим, когда требуется охарактеризовать качество воды в конкретное время и в конкретном месте, отобрать различные объемы пробы, или когда отбор проб происходит в непостоянных водотоках. Они также применяются для установления истории данных о качестве воды, основанных на относительно коротких интервалах времени.

Грейферные дискретные пробы (локальные) берут в определенном месте, на определенной глубине и в определенное время, а затем анализируют интересующие компоненты.

Грейферные, интегрированные по глубине пробы, отбирают по всей глубине водного столба и в определенном месте и времени.

### 17.2.1.2 *Составные пробы*

Составные пробы получаются путем смешивания нескольких дискретных проб равных или взвешенных объемов в одном контейнере, часть которой затем анализируется на предмет составляющих, или посредством отбора проб потока за определенный период времени.

Составная проба обеспечивает оценку среднего качества воды за время отбора пробы. Их очевидное преимущество заключается в экономии за счет уменьшения количества проб, которые следует проанализировать. С другой стороны, составные пробы не позволяют обнаружить изменения элементов, которые происходят за время отбора пробы.

Имеются два основных вида составной пробы — последовательная и составная пропорционально потоку.

Последовательная проба образуется непрерывным, постоянным накачиванием пробы или смешением равных объемов воды, собранных в регулярные интервалы времени.

Проба, составная пропорционально потоку, получается в результате непрерывного накачивания со скоростью, пропорциональной потоку, смешением равных объемов воды, собранной с временными интервалами, которые обратно пропорциональны объему потока, или смешением объемов воды, пропорциональных потоку и отобранных через одинаковые временные интервалы.

### 17.2.2 *Отбор репрезентативных проб воды*

Для взятия проб на местах, расположенных на однородном, с хорошим перемешиванием участке русла, может быть достаточным отбор интегрированных по глубине проб в одной вертикали. Для небольших потоков обычно достаточно грейферной пробы, взятой в центре потока.

В других случаях, может возникнуть необходимость отобрать пробы для разреза русла в ряде точек и глубин. Количество и типы отобранных проб зависят от ширины, глубины, расхода, количества переносимых взвешенных наносов и существующей водной жизни. Обычно, чем больше точек взятия проб в разрезе, тем более репрезентативной будет составная проба. Как правило, достаточно использовать от трех до пяти вертикалей, а для мелких и узких потоков требуется еще меньшее количество.

Наиболее общим является метод инкремента равной ширины, в котором вертикали располагаются на равном расстоянии по течению. Для метода инкремента равного расхода требуется знать детальное распределение потока в разрезе, чтобы разбить разрез на вертикали, расположенные пропорционально приращениям расходов.

**17.2.3        *Оборудование и методика отбора проб в полевых условиях*****17.2.3.1      Грейферные пробоотборники**

Пробоотборники для взятия грейферных проб можно разделить на те, которые пригодны только для нелетучих компонентов и те, которые можно использовать для растворенных газов и других летучих компонентов. Для обоих видов имеются пробоотборники дискретные (поверхностные или для заданной глубины) и интегрированные по глубине. Оба вида можно использовать при отборе воды для определения нелетучих компонентов. Для этой же цели можно использовать батометр с несколькими бутылками.

Приблизительно интегрированную по глубине пробу можно получить, опуская открытые пробоотборное устройство на дно водного объекта и поднимая его на поверхность с постоянной скоростью таким образом, что емкость становится наполненной только достигнув поверхности. Для этой цели могут использоваться жесткие пробоотборники. Они представляют собой устройства, иногда железные, которые применяются для крепления бутыли. Бутыли для проб помещаются в жесткий каркас и закрепляются держателем за горлышко. В некоторых случаях, жесткий пробоотборник может снабжаться грузами для увеличения веса, чтобы обеспечить вертикальное положение при сильном течении.

Самый простой способ заключается в использовании пластиковой трубы, утяжеленной на одном конце, имеющей внутренний диаметр, достаточный для получения пробы необходимого объема, например 4 л, которая опускается утяжеленным концом на заданную глубину, при этом зажимается верхний конец, трубка поднимается, и содержимое выливают в емкость для проб.

Невозможно взять интегрированную по глубине пробу на мелких потоках с недостаточной для этого глубиной. В таких случаях пробу следует отбирать осторожно, не касаясь дна. Можно вырыть углубление на дне, подождать осаждениязвеси и взять пробу у верхней границы углубления.

Дискретные пробоотборники применяются для взятия проб с определенной глубиной. Соответствующий пробоотборник опускается на заданную глубину, приводится в рабочее положение, а затем возвращается к исходному положению. Для этих целей часто применяются пробоотборники Ван-Дорна, Кеммерера и насосный:

- a) бутылка Ван-Дорна: бутылка Ван-Дорна предназначена для отбора проб на глубине от двух метров. Два типа этого пробоотборника показаны на рисунке 17.1. Они сделаны из поливинилхлоридных или акриловых пластиковых материалов и могут использоваться для взятия стандартных проб и проб на трасерные металлы. Горизонтальный тип следует применять при взятии проб у дна, у границы раздела водных масс с разной мутностью или при необходимости отбора проб в узкой полосе по глубине, например галоклин, термоклин. Существуют пробоотборники с объемом пробы от 2 до 16 литров;

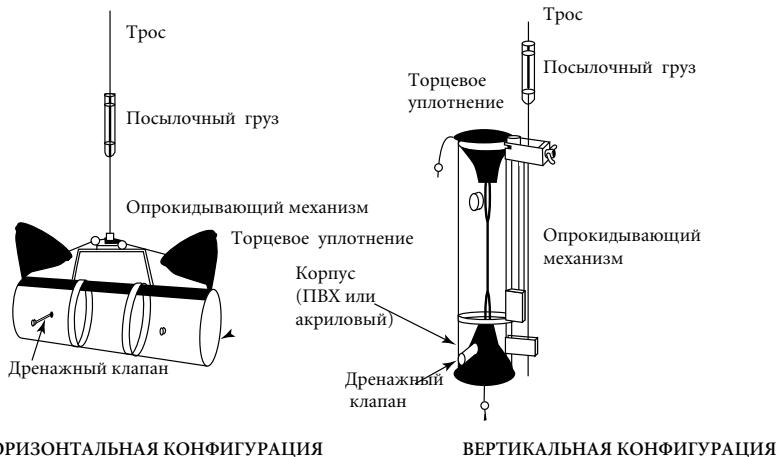


Рисунок 17.1 — Бутылка Ван-Дорна



Рисунок 17.2 — Пробоотборник Кеммерера

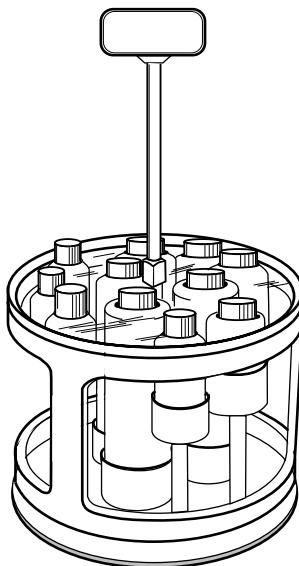


Рисунок 17.3 — Батометр с несколькими бутылками

- b) пробоотборник Кеммерера: пробоотборник Кеммерера — один из самых старых видов вертикальных пробоотборников, применяемый обычно на глубинах выше одного метра. Показанный на рисунке 17.2 пробоотборник Кеммерера имеет латунный или никелированный латунный корпус для стандартного отбора проб. Для проб на трасерные металлы, он выполняется из поливинилхлорида или акрилового пластика с пробкой из силиконовой резины. Оба вида пробоотборников из металла и пластика берут пробы объемом от 0,5 до 8 литров;
- c) насосные пробоотборники: существует три вида насосов для отбора проб с заданных глубин: диафрагмальный, перистальтический и роторный. Обычно диафрагмальный насос — ручной, а перистальтический и роторный — электрические, поэтому их применение в полевых условиях значительно ограничено. Перистальтический насос не рекомендуется применять для отбора проб на анализ хлорофилла, поскольку может иметь место нарушение частиц водорослей. Все насосы должны иметь конструкцию, не загрязняющую пробу воды. Входное и выходное отверстия шлангов также должны быть чистыми.

Бутылка Ван-Дорна имеет преимущество перед пробоотборником Кеммерера в том, что ее крышка не мешает потоку воды проходить через пробоотборник, так как в противном случае, это может привести к завихрениям и нарушениям структуры потока.

Батометр с несколькими бутылками (рисунок 17.3) позволяет одновременно брать в точке несколько проб одного и того же или различного объема. Каждая

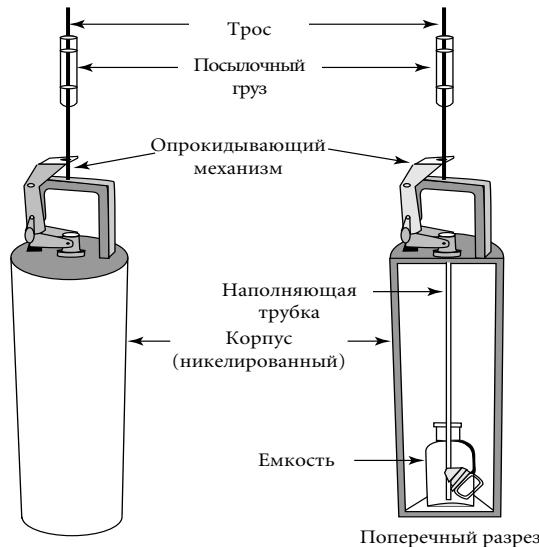


Рисунок 17.4 — Пробоотборник для проб на растворенный кислород

проба отбирается в отдельную бутылку. При взятии проб одинакового объема можно получить информацию о мгновенной изменчивости на основе сравнения дубликатов проб. Пробоотборник может быть переделан для различного количества бутылей и их объемов, в соответствии с требованиями специальных программ. Это достигается изменением размера чашек, длины чашечных втулок и конфигурацией и размером отверстий на чистой акриловой верхней части.

#### 17.2.3.2     Пробоотборники для проб на растворенный кислород

Типичный пробоотборник для определения концентрации растворенного кислорода и биохимической потребности в кислороде (БПК) показан на рисунке 17.4. Его нужно вытаскивать открытым, в результате чего возможно попадание смеси из верхних слоев. Когда грейферные пробоотборники определенного вида снажены донными дренажными трубками, они могут применяться путем заполнения пробы через дно емкости для анализа. Пробы должны отбираться в бутыли с узким горлом для БПК, которые имеют склоненные стеклянные крышки во избежание проникновения в пробу воздуха. Этим пробоотборником нежелательно брать пробы на мелких потоках. В ином случае перемешивание следует уменьшить, аккуратно отклоняя бутылку БПК вниз по течению.

#### 17.2.3.3     Автоматические пробоотборники

Диапазон автоматических пробоотборников варьируется от сложных устройств с изменяющимися программами отбора проб, которым нужен внешний энергоисточник и

постоянное помещение, до простых портативных самообеспечивающих приборов, таких как погруженная бутылка с интенсивностью заполнения, определяемой медленным выходом воздуха.

Иногда такие приборы могут быть запрограммированы на отбор пробы в течение продолжительного периода времени, но учитывая, что максимальное допустимое время отбора пробы до ее анализа равно 24 часам, большинство из них запрограммированы на 24 часа. При необходимости проведения частых измерений они снижают затраты на эти работы. Если на гидростворе установлен автоматический измеритель расхода, некоторые автоматические пробоотборники могут отбирать пробу пропорционально стоку. Имеются как составные (изменяющие расход и отбирающие пробу), так и отдельные модели пробоотборников.

**17.2.3.4      Влияние местоположения станции и времени года на порядок отбора проб**  
В полевых условиях различные ситуации, возникающие при отборе проб, требуют различных практических приемов. Способы взятия проб воды на мелководьях отличаются от способов, применяемых на глубоких участках. Специалисты, работающие в полевых условиях, должны знать, как поступать в этих ситуациях. В следующих разделах рассмотрены некоторые практические приемы отбора проб, связанные с сезоном и размещением точек отбора проб. Более детально практические приемы отбора проб рассматриваются в [1].

Часто наиболее предпочтительно производить отбор проб с моста, из-за легких подходов и безопасности при всех стоковых и погодных условиях. Однако транспортные средства на мостах представляют другой потенциальный источник опасности, который следует учитывать (раздел 18.3).

Использование лодок дает больше возможностей и благодаря их использованию снижается время передвижения между точками отбора проб. Точки отбора должны быть отмечены триангуляционными знаками с береговыми вешками, при установке которых необходимо учитывать наличие судоходства, паводков и штормовых условий (раздел 18.5).

Самолеты и вертолеты — очень дорогой, но быстрый и надежный способ передвижения. Испытания показали, что волнение воды от вертолетов незначительно влияет даже на содержание растворенного кислорода в пробах воды.

Пробы с берега следует брать только при отсутствии других возможностей. Пробу необходимо брать в месте с высокой турбулентностью или там, где глубоко и быстрое течение. Жесткие пробоотборники часто применяются при взятии проб воды с берега или с пристаний.

Взятие проб снега и льда в зимних условиях требует применения несколько отличной методики. Следует соблюдать меры предосторожности, описанные в разделе 18.9.3. Необходимо также очистить лежащий на льду снег, чтобы обеспечить соответствующую рабочую площадку.

**17.3 Подготовка к выезду в поле****17.3.1 Общая подготовка**

- a) Получить специальные инструкции по методике отбора проб;
- b) Подготовить маршрут в соответствии с планом отбора проб (см. также раздел 21.3);
- c) Подготовить перечень необходимого оборудования и материалов;
- d) Обеспечить наличие бутылей для отбора проб, вымытых в соответствии со стандартными процедурами;
- e) Обеспечить подготовку в лаборатории химических реагентов и других компонентов, необходимых для данной полевой работы;
- f) Подготовить контрольный перечень (раздел 17.3.3).

**17.3.2 Определение объема пробы**

Объемы конкретных проб зависят от типа и количества анализируемых параметров, от аналитического метода обработки и от предполагаемой концентрации элементов в воде. Персонал лаборатории определит необходимый объем пробы. Требуемый объем можно установить путем перечисления всех определяемых параметров и добавляя объем, необходимый для подготовки и анализа, полученную величину затем умножают на два для двойного и три для тройного анализа.

Следует помнить следующие моменты:

- a) если нужно избежать взаимодействия пробы с воздухом, емкость с пробой следует надежно закупорить;
- b) если перед анализом пробы ее необходимо интенсивно взбалтывать, емкость с пробой не следует плотно закупоривать;
- c) в случае, когда необходимо выполнить оба условия, емкость следует плотно закупорить, предварительно добавив частицы стерильного, совершенно инертного твердого вещества, например бусины;
- d) если в пробе содержатся отдельные частицы, т. е. нерастворенные компоненты, бактерии и водоросли, то для снижения погрешности требуется гораздо больший объем пробы, чем обычно.

**17.3.3 Перечень контрольных мероприятий перед полевыми работами**

- a) Проверить и откалибровать измерительные устройства (рН, удельной проводимости, растворенного кислорода, мутности) и термометры;
- b) Пополнить запасы реагентов для определения растворенного кислорода и реагентов для химической консервации пробы;
- c) Получить чистый защитный раствор. Величина рН для него не должна быть близкой к предполагаемой величине рН пробы;
- d) Получить раствор KCl для проб на рН;

- e) Получить карту местности, описание размещения пунктов отбора проб, полевые салфетки, бутыли для проб, бирки, пробоотборное оборудование, консерванты, пипетки и руководства по использованию оборудования;
- f) Получить канцелярские принадлежности, дополнительные веревки и набор инструментов;
- g) Если полевое оборудование имеет электропитание, получить электрические кабели;
- h) Получить дистиллированную воду для определения pH, чистых и буферных измерений;
- i) При необходимости фильтрования, получить фильтрующее устройство;
- j) Если необходимо взять пробы для микробиологических исследований, получить стерильные бутыли и ящики со льдом, которые рекомендуются для хранения проб;
- k) Проверить содержание аварийного снаряжения и комплекта для оказания первой помощи.

## 17.4       **Фильтрация и способы консервации проб в полевых условиях**

### 17.4.1      **Фильтрация**

Фильтрация пробы рекомендуется для отделения растворенных веществ от взвешенных частиц. Фильтрация при помощи центрифуги требует большого количества дополнительного оборудования, а фильтрация путем осаждения — большего времени. Оба способа трудно калибруются и могут увеличить вероятность загрязнения пробы. В полевых условиях фильтрацию следует выполнять во время или непосредственно после отбора проб и заканчивать соответствующим процессом консервации.

Общую концентрацию металлов можно определить при помощи параллельного отбора второй, нефильтруемой пробы. В лаборатории эту пробу подвергнут специальной обработке, чтобы преобразовать металлы в соединения, растворимые в воде.

Пробы, взятые для анализа на органические компоненты, фильтруются непосредственно после отбора при помощи стекловолокнистого фильтра или металлической мембранны. Отфильтрованный раствор можно анализировать на растворенные органические компоненты, а фракции на фильтре — на органические частицы.

Серьезная проблема может возникнуть из-за поглощения фильтрующим материалом растворенных веществ. Для решения этой проблемы существует множество предложений в отношении того, какие материалы лучше использовать, например, органические фильтры (поликарбонатные, ацетатно-целлюлоидные) для минеральных веществ, а фильтры из стекловолокна для органических соединений.

Фильтры и фильтрационный прибор требуют предварительной обработки в лаборатории, а перед фильтрацией их следует промыть частью отбранной пробы, объемом около 150–200 мл. Для создания давления в фильтрационном приборе следует использовать ручной или электрический насос. При использовании

электронасоса для фильтрации потребуется подключение к электросети или переносному источнику питания. Создание вакуума может привести к изменению величины pH в результате потери двуокиси углерода, а также к осаждению некоторых металлов. По этой причине и для снижения потерь за счет адсорбции на стенах сосуда, пробы на металлы часто окисляют.

#### 17.4.2 *Способы консервации*

За время между отбором пробы и ее анализом в лаборатории могут произойти физические, химические и биохимические изменения. Во многих случаях это время нужно сократить до минимума или прибегнуть к консервации пробы.

Для некоторых компонентов консервация невозможна, и измерения должны проводиться в полевых условиях. Даже если определяемый элемент довольно стабилен, обычно пробы все равно следует законсервировать. Это выполняется различными способами, например сохраняя пробы в темном месте, добавляя химические консерванты, снижая температуру для замедления реакций, замораживая пробу, путем приготовления экстрактов с различными растворителями, применяя полевую колонковую хромотографию или используя сочетание этих способов.

Ввиду ограниченности сведений в отношении консервации проб, все рекомендации по этому вопросу следует рассматривать в качестве экспериментальных до тех пор, пока опытным путем не будет подтверждена их эффективность.

##### 17.4.2.1 *Емкости для проб*

Применение соответствующих емкостей очень важно при консервации для сохранения целостности пробы.

Обычно бутыли для проб обеспечивает аналитическая лаборатория. Они имеются двух видов — пластиковые и стеклянные. Боросиликатное стекло инертно по отношению к большинству материалов и рекомендуется, когда требуется стеклянная емкость, например при отборе проб на органические компоненты. Полиэтиленовые емкости являются довольно дешевыми и гораздо меньше поглощают ионы металлов. Их применяют для проб, которые предстоит проанализировать на неорганические компоненты, например на главные ионы и металлы. Полиэтиленовые емкости нельзя использовать для отбора проб на органику, например на пестициды и некоторые летучие вещества, которые рассеиваются через пластиковые стенки. Для светочувствительных проб нужна светонепроницаемая или непроницаемая для ультрафиолета стеклянная посуда. Для растворенных газов используют бутыли с узким горлом и коническими стеклянными пробками. Емкости для микробиологических проб должны выдерживать стерилизацию в автоклаве или с помощью этилового спирта.

Крышки для бутылей являются потенциальным источником проблем. Стеклянные пробки могут заливать, особенно при щелочных пробах.

Прокладки под крышки, сделанные не из тефлона, могут стать источником искусственных загрязнителей или абсорбировать незначительное количество пробы.

Чем меньше концентрация определяемого компонента, тем более важными становятся вышеупомянутые проблемы.

Рекомендации по выбору емкости, в зависимости от исследуемого компонента, содержатся во многих публикациях.

#### 17.4.2.2 *Добавление химических веществ*

Этот способ применяется для большинства растворенных металлов и кислотных гербицидов. Некоторые пробы на биологический анализ также требуют химической консервации.

Как правило, предпочтительней использовать относительно концентрированный раствор или консервант. В этом случае корректировка пробы на разбавление консервантом будет совсем незначительной.

Потенциальные сложности, которые создает консервант для анализа, требуют четкого следования методике. Например кислота может нарушить распределение взвешенных материалов и вызвать растворение металлов, находящихся в пробе либо в коллоидной форме, либо в виде твердых частиц. Поэтому, очень важно соблюдать следующий порядок — вначале фильтрация, а затем добавление кислоты.

#### 17.4.2.3 *Замораживание*

Замораживание применяют для определенных видов анализа, а не в качестве обычной процедуры консервации, поскольку оно может вызвать физико-химические изменения пробы, например образование осадка и улетучивание растворенных газов, что может повлиять на состав пробы. Кроме того, твердые частицы, находящиеся в пробе, при замораживании и оттаивании изменяются, а необходимым условием для любого анализа может быть возврат в состояние равновесия, за которым следует быстрая гомогенизация.

Никогда нельзя замораживать пробы воды в стеклянной посуде.

#### 17.4.2.4 *Охлаждение*

Охлаждение до 4 °C или до появления льда является обычным способом консервации. Его преимущество заключается в том, что не нужно добавлять в пробу какие-либо вещества, которые в дальнейшем могут усложнить анализ. Однако этот способ не позволяет полностью сохранить целостность всех компонентов. В отдельных случаях охлаждение может повлиять на растворимость некоторых веществ и привести к их осаждению. Охлаждение часто используют совместно с добавлением консервантов.

Стеклянные емкости, заполненные до краев, следует хранить при более низкой температуре, ниже 4 °C, чтобы избежать расширения объема при нагревании.

#### 17.4.2.5 *Практические аспекты консервации*

Важным практическим аспектом консервации является определенный последовательный порядок действий для гарантии того, что все пробы, требующие консервации, незамедлительно получают необходимую обработку. Это особенно важно при добавлении химического консерванта, поскольку такая добавка может привести к трудноопределяемым изменениям в характере пробы. Целесообразно отмечать все законсервированные пробы, чтобы гарантировать их от повторной обработки.

Безопасность и точность добавления химических консервантов в полевых условиях требует соблюдения специальных мер предосторожности. Заранее откалиброванные и автоматические пипетки обеспечивают в полевых условиях точность добавления консерванта и устраниют опасность случайного проливания кислоты из пипетки. Зачастую бывает удобным добавить консервант в емкость для проб непосредственно в лаборатории, перед выездом в поле. Другая возможность заключается в использовании цветового кода или в наклеивании бирки на запечатанные пузырьки, с заранее измеренным объемом консерванта. Несмотря на то что этот способ является более дорогим, он имеет преимущество из-за простоты полевой процедуры консервации, снижения вероятности ошибки и внесения загрязнителей.

### 17.5 *Измерения в полевых условиях*

#### 17.5.1 *Автоматический мониторинг*

Один из видов мониторинга предусматривает откачку воды и проведение измерений на берегу. Другие устройства используют зонды, погружаемые в воду, которые проводят измерения непосредственно на заданной глубине. Самым современным является устройство с автономным питанием на батареях, которое может работать на глубине до 300 м.

В настоящее время автоматически измеряются следующие параметры: pH, температура, удельная проводимость, мутность, растворенный кислород, хлориды, окислительно-восстановительный потенциал, уровень воды, интенсивность солнечного света и ультрафиолетовая поглощаемость.

#### 17.5.2 *Параметры, измеряемые в полевых условиях*

Удельная проводимость, pH, растворенный кислород, температура, мутность, цвет и прозрачность могут изменяться при хранении пробы и поэтому должны измеряться в полевых условиях, по возможности, сразу после отбора пробы.

Наблюдатель, берущий пробу, должен отмечать все необычные проявления или отклонения от предшествующего состояния на водном объекте. Эти наблюдения за качеством воды могут включать: необычный цвет, запах, пленки на поверхности и плавающие предметы. Следует отмечать также любые специфические условия окружающей среды, например: дождь, сильный ветер, паводок или вскрытие ледяного покрова.

### 17.5.2.1 Измерение pH

Величина pH незагрязненных природных вод зависит от условий равновесия ионов двуокиси углерода, карбоната и гидрокарбоната. Концентрация двуокиси углерода может существенно меняться в результате изменения границы раздела воздух—вода или в результате фотосинтеза и процессов разложения.

Изменения pH вызываются кислотными дождями, сбросами промышленных вод, дренированием полезных ископаемых или выщелачиванием минералов. Величина pH является важным критерием качества воды, поскольку она оказывает влияние на водную жизнь и на возможность использования воды.

Определение величины pH желательно проводить в точке отбора проб. Из-за простоты и точности более предпочтительно использовать электрометрический способ измерения pH. Величина pH пропорциональна электродвижущей силе или электрическому потенциалу между стеклянным электродом, ответственным за водород, и эталонным электродом, погруженным в пробу. В настоящее время существует много различных портативных измерителей pH, работающих на батареях. При проведении измерений необходимо выбрать устройство, которое наилучшим образом подходит к конкретной ситуации. Цифровые измерители предпочтительней, поскольку аналоговые шкалы (например шкала со стрелкой) иногда трудно читаются при полевых измерениях, например в лодке при волнении.

Определение pH можно выполнять также колориметрическим способом при помощи индикаторов pH и буферных растворов, путем визуального или колориметрического сравнения. Обычно этот метод менее точен, чем электрометрический, и ограничен использованием воды с низким содержанием красящих веществ и незначительной мутностью.

При полевых измерениях измеритель следует заранее откалибровать по стандартному буферному раствору в соответствии с руководством по использованию. Необходимо выровнять температуру буферного раствора и электродов путем погружения бутылей с буферным раствором и электродов в пробу воды. Особую осторожность следует проявлять в целях предотвращения попадания воды в бутыли с буферным раствором и в отверстие эталонного электрода. Аналогичная процедура заключается в измерении температуры буферного раствора для калибровки измерителя pH, а затем в подгонке температуры к температуре пробы. Если электроды давно не использовались или содержались в течение нескольких дней сухими, может понадобиться от 10 до 20 минут для стабилизации температуры.

Следует оберегать измеритель от экстремальных температурных изменений при измерении, поскольку это влияет на устойчивость электронной системы и точность измерений.

Если комбинированные устройства электродов долго находились в сухом состоянии, стеклянную мембрانу необходимо намочить в растворе 3 моль·л<sup>-1</sup> KCl за 12–24 часа до применения. Измерители могут иметь резервуар для

хранения зонда, который должен заполняться электролитом. Неправильно подготовленные перед использованием стеклянные электроды могут не стабилизироваться и потребуют частой калибровки.

Если измеритель pH показывает плавное отклонение, а зонд заполнен и правильно подготовлен, необходимо сам зонд заполнить дополнительным раствором 3 моль·л<sup>-1</sup> KCl. Самая общая причина неисправности комбинированного электродного устройства заключается в блокировании диафрагмы. В том случае, когда происходит постоянное отклонение, следует заполнить электрод гидроксидом аммония. Зонд, как и любую другую часть оборудования, необходимо постоянно берегать от загрязнения, низкой температуры и неосторожного обращения.

#### 17.5.2.2 Измерение электропроводности

Большинство неорганических солей, кислот и базовых элементов в воде разлагаются на ионы. Многие органические вещества разлагаются в меньшей степени или не разлагаются вообще. Несмотря на то, что по электропроводности нельзя установить конкретные вещества, ее изменения могут указать на интрузию морских вод и другие источники загрязнения. Для большинства природных вод существует линейная зависимость между содержанием растворенных солей и электропроводностью. Изменения в этой зависимости показывают на изменение соотношения различных солей, и, следовательно, на изменение количества растворенных веществ, поступающих в водный объект.

Более предпочтительно измерять электропроводность непосредственно на месте. Электропроводность зависит от температуры. Если во время измерений автоматически не вносятся поправки на температуру, то ее нужно измерять одновременно с электропроводностью.

Измеритель электропроводности нужно калибровать перед каждым полевым измерением. Для этого должен использоваться стандартный раствор KCl с удельной электропроводностью, близкой по величине к ожидаемой при полевых измерениях. Нельзя использовать для измерения электропроводности ту же пробу, которая использовалась для измерения pH, так как происходит диффузия KCl с электрода для измерения pH. В этой связи необходимо несколько раз прополоскать водой емкость для отбора проб и измеритель для пробы.

Устройство для измерения электропроводности требует осторожного обращения и обслуживания, предъявляемого ко всем чувствительным приборам. Точность показаний требует защиты измерительного устройства от грязи, ударов и низкой температуры.

Точность измерения зависит от типа измерительного устройства, способа тарировки и от фактической величины электропроводности пробы воды. При правильном выборе и точной тарировке измерительного устройства погрешность измерения составляет  $\pm 5\%$  от диапазона изменения электропроводности, если

температура находится в пределах 0–40 °С, и температурная поправка вводится автоматически. По этой причине для выбора измерительного устройства желательно знать вероятный диапазон изменения электропроводности в данной пробе. Например, электропроводность внутренних вод составляет порядка 0,01–0,02 мкСм·м<sup>-1</sup>, и в данном случае неблагоразумно использовать измерительное устройство, предназначенное для соленых вод, электропроводность которых составляет 2,5–3,0 мкСм·м<sup>-1</sup>.

### 17.5.2.3 Измерение растворенного кислорода

Концентрация растворенного кислорода является важным показателем для оценки качества поверхностных и обработанных сточных вод.

Растворенный кислород (РК) должен измеряться на месте, поскольку если пробы недостаточно хорошо консервирована, его концентрация может измениться очень быстро. Даже в случае консервации пробы, желательно приступить к анализу в течение трех часов после отбора. Концентрация растворенного кислорода может измеряться непосредственно счетчиком РК или с помощью химического метода, например такого, как анализ Винклера. Для самых точных измерений используют потенциометрический метод.

Отбираются три пробы воды пробоотборником для растворенного кислорода (раздел 17.2.3.2), затем измеряется концентрация растворенного кислорода счетчиком РК или методом Винклера. За истинное показание принимают среднее из, по крайней мере, двух отсчетов, отличающихся не более чем на 0,5 мг·л<sup>-1</sup>.

Существуют два типа счетчиков растворенного кислорода — полярографический и потенциометрический. Эти приборы реагируют на активность кислорода, а не на концентрацию, поэтому их показания в пресной воде, насыщенной кислородом, и в соленой, насыщенной кислородом, одинаковы при одном и том же давлении и температуре, несмотря на то что растворимость кислорода в соленой воде меньше. Эти процессы также зависят от температуры, и для большинства приборов требуется внесение температурной поправки в показания.

Счетчики РК можно использовать в тех случаях, когда затруднено использование иодометрических методов (например анализ Винклера), или когда пробы сильно окрашены, замутнены, содержит быстро окисляемые вещества или другие мешающие субстанции, такие, как сульфит, тиосульфат, политионат, железистые соединения или свободный хлор. Этот метод также можно использовать, когда требуется непрерывная фиксация значений растворенного кислорода совместно с измерениями БПК.

Для более высокой точности измерений растворенного кислорода в полевых и лабораторных условиях используется метод Винклера. Существует несколько типов иодометрического метода, в частности тип Альстерберга, которому не мешает наличие в пробе ионов нитритов.

Для определения концентрации растворенного кислорода в полевых условиях применяют метод Хача. Он включает те же химические реакции, что и титрование по методу Винклера. Реагенты, за исключением титранта, предварительно подготовленные и доведенные до необходимой концентрации, содержатся в отдельной «пудренице».

Этот метод может использоваться, когда для исследования достаточна точность от  $\pm 0,5$  до  $1,0 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  истинного значения.

Существуют возможности для получения точности менее 1 % от всего данного диапазона концентрации растворенного кислорода, но более реальна погрешность измерения, равная 3 % в пределах  $10^\circ\text{C}$ . Вообще, если проба имеет относительно высокое содержание растворенного кислорода, то указанная точность соответствует действительности, но в случаях малого содержания растворенного кислорода, в анализе важно использовать свежую пробу и тщательно откалиброванный измерительный прибор.

#### 17.5.2.4 *Измерение температуры*

Для измерения температуры воды применяются термометры различных типов: спирто-толуоловые, ртутные или электротермометры. Последняя категория включает термопары и менее портативные виды — термисторы, кварцевые и термометры сопротивления. Некоторые измерительные приборы, например для измерения растворенного кислорода или удельной проводимости, снабжены устройством для определения температуры.

При использовании термометра его сначала поливают частью пробы, а затем погружают в пробу приблизительно на 1 минуту или до стабилизации его показаний. Нельзя помещать термометры в емкости с пробой, которые направляются в лабораторию. Значение температуры регистрируют в полевых бланках в градусах Цельсия.

Обычно точность измерения температуры не превышает  $0,1^\circ\text{C}$ , а во многих случаях вполне приемлемой оказывается точность наблюдений за температурой воды в  $0,5^\circ\text{C}$ , иногда же она может приближаться к  $1^\circ\text{C}$ . Поэтому важно точно определить требования, предъявляемые к точности измерения, чтобы выбрать соответствующий тип термометра.

#### 17.5.2.5 *Измерение мутности*

Мутность является оптической мерой взвешенных частиц в пробе воды, таких, как глина, ил, органические частицы, планктон и микроскопические организмы. Мутность оказывает влияние фактически на все виды водопользования и увеличивает затраты на обработку воды.

По возможности, мутность следует измерять в точке. Для измерения мутности используют визуальный метод (в единицах мутности Джексона или JTU) или нефелометрическим методом (в нефелометрических единицах мутности или NTU).

При применении мутномера Джексона определяется расстояние, на котором теряет очертания световой объект и сравнивается со стандартными взвесями.

Нефелометрический метод предпочтительней, поскольку обладает большей точностью, чувствительностью и применяется в большом диапазоне изменения мутности. Однако разные конструкции приборов могут дать различные результаты для одной и той же пробы. К ошибке может привести цвет пробы, так как будет изменяться интенсивность источника света. Эти проблемы можно уменьшить, применяя устройство, которое одновременно измеряет рассеивание и прохождение света, преобразуя затем их в расстояние.

Для работы измерителя мутности готовят тарировочные кривые по каждому прибору при помощи соответствующих стандартов. Испытывают, по крайней мере, один стандарт в каждом используемом диапазоне, добиваясь от измерителя мутности стабильных результатов во всех диапазонах чувствительности. Перед проведением анализа пробу интенсивно встряхивают. Снятие показаний всегда производится через один и тот же промежуток времени, который требуется для того, чтобы пробы стала однородной (например 10 секунд), что гарантирует единобразие результатов. Важно быстро вылить пробу и три раза выполнить измерение мутности.

Характеристика каждого прибора для измерения мутности зависит от частоты тарирования по стандартному раствору формазина и от способа подготовки пробы. Как правило, нефелометры, используемые в лабораторных условиях, должны давать точность в пределах  $\pm 1$  ЕМФ (единица мутности формазина) в диапазоне 0–10 ЕМФ и  $\pm 5$  ЕМФ в диапазоне 0–100 ЕМФ при 95 % доверительном уровне. Точность абсорбциометров существенно колеблется, но должна составлять, по меньшей мере, 10 % для любого данного диапазона мутности.

При практическом использовании прибора для измерения мутности его характеристика зависит, в большей мере, от оптической конфигурации, а для приборов, измеряющих мутность проточных вод с непрерывной записью, их характеристика зависит от способности выдерживать загрязнение оптических поверхностей водорослями и отложениями наносов, которые влияют на тарировку и чувствительность.

#### 17.5.2.6 Измерение цвета воды

Истинный цвет наблюдается после фильтрации или очистки на центрифуге. Цвет определяется присутствием в воде ионов металлов, гумуса и торфяных материалов, планктона и промышленных стоков. Цвет является важной характеристикой воды для питьевых нужд, мытья и обработки, а также для рекреационных целей.

Исходному цвету природной воды может соответствовать смесь хлороплатиновой кислоты и гексагидрата хлорида кобальта. Но поскольку этот способ сравнения не очень удобен для полевых условий, цвет определяют визуально, сравнивая стандартные цветные стеклянные диски с цветом отбранной пробы.

Вода, смешанная с промышленными отходами, может так сильно отличаться от платиново-кобальтовой смеси, что сравнение выполнить невозможно. В этих случаях используют фотометр с фильтром или, при обработке пробы в лаборатории, — двухлучевой спектрофотометр.

#### 17.5.2.7 *Измерение прозрачности*

Прозрачность воды определяется ее цветом и мутностью. Значение прозрачности представляет собой глубину в метрах, на которой диск диаметром 20–30 см, называемый диском Секки и обычно окрашенный в виде черных и белых квадратов, становится невидимым при медленном, вертикальном погружении в воду. Иногда вместо диска применяют вид стандартной раскраски на белой бумаге. Эти измерения обычно проводятся на озерах и других глубоких водных объектах и полезны для оценки биологических условий.

#### 17.5.2.8 *Общие резюме полевых измерений*

Несмотря на заинтересованность в измерении тех или иных параметров, на всех станциях должны выполняться стандартные работы. На каждой станции следует придерживаться следующих основных процедур:

- a) тарировать измерительные устройства;
- b) стандартизировать тиосульфат натрия при применении метода Винклера для измерения растворенного кислорода;
- c) выполнять полевые измерения или измерения на месте pH, электропроводимости, растворенного кислорода, температуры и мутности;
- d) ополаскивать все емкости водой для пробы, за исключением бутылей с консервантом, и используемых для измерения растворенного кислорода и бактериального анализа;
- e) отбирать и консервировать пробы в соответствии с инструкцией по наставлению;
- f) правильно заполнять полевые бланки в соответствии с инструкцией по наставлению;
- g) упаковывать емкости для проб в специальные контейнеры;
- h) помечать тару и заполнять полевые бланки, записывая всю необходимую информацию.

### 17.6 Измерение радиоактивности

#### 17.6.1 *Источники радиоактивности в воде*

Радиоактивность в воде может носить естественный и антропогенный характер. Основными природными источниками ее является вымывание из горных пород, содержащих радиоактивные минералы и попадание радионуклидов с космическим излучением. Главные источники искусственной радиоактивности — добыча урана, атомные станции, испытание ядерного оружия и мирное использование ядерных материалов и приборов.

Основные элементы, поступающие в поверхностные и подземные воды естественным путем, — это уран, радий-226, радий-228, радон, калий-40, тритий и углерод-14. Все они, кроме двух последних, поступают из радиоактивных минералов. В районах с большим количеством радиоактивных минералов, главным радиоактивным компонентом, присутствующим в воде, является природный уран. Тритий и углерод-14 образуются путем взаимодействия нейтронов космического излучения с азотом в верхних слоях атмосферы. Тритий обычно выпадает вместе с осадками, а радиоактивный углерод связывается в атмосфере с двуокисью углерода. Эти радионуклиды также образуются при испытании ядерного оружия. Начиная с 1970 года, вероятно, самым большим источником трития стала ядерная энергетика. Основными изотопами искусственного происхождения, присутствующими в воде, являются стронций-90 и цезий-137.

Контроль радиоактивности веществ, находящихся в воде в растворенном состоянии и в виде частиц, осуществляется теми же приборами, что и других компонентов геогидрологической среды. Геохимическое поведение дочерних элементов может существенно отличаться от поведения исходных радиоактивных, хотя их распространение, распределение и перенос может определяться исходным элементом.

Международная комиссия по радиологической защите рекомендует максимально допустимые уровни загрязнения для различных изотопов, от которых зависит также максимально допустимая их концентрация в воде.

### 17.6.2 *Отбор и консервация проб*

Специальные емкости для проб обычно делают из полипропилена, полиэтилена или тefлона. Они должны быть заранее (за день) обработаны путем добавления в них концентрированной азотной кислоты, предварительно промыв их дезинфицирующим средством и несколько раз прополоскав чистой водой. Основная проблема, с которой можно встретиться при консервации, заключается в адсорбировании пробы на стенках емкости или на взвешенных структурах.

Пробу отбирают в четырехлитровые бутыли. Для сохранения металлов и уменьшения адсорбции в раствор добавляют два миллилитра концентрированной соляной кислоты или однопроцентной азотной концентрации на литр пробы, а уже затем бутыли отправляют в лабораторию.

Один из вариантов заключается в ежемесячном отборе проб на радиоактивность с последующим анализом годовой составной пробы. Это достигается путем смешивания месячных проб объемом 400 миллилитров. При существенном превышении уровня радиоактивности над фоновым, пробы на радиоактивность обрабатывают отдельно, чтобы определить более радиоактивные.

Подробные инструкции по анализу радиоизотопов и вопросы качества воды представлены в геологическом обзоре США *National Handbook of Recommended*

*Methods for Water Data Acquisition* [3] (Национальный справочник рекомендуемых методов получения данных о воде); там же описаны рекомендуемые емкости и методы консервации.

### 17.7        Отбор проб для биологического анализа

#### 17.7.1      Микробиологический анализ

Присутствие в воде живых фекальных бактерий кишечной палочки характеризует недостаточную обработку сточных вод. Всемирная организация здравоохранения требует, чтобы в питьевом водоснабжении использовалась вода, в которой полностью отсутствуют кишечные палочки и особенно фекальные кишечные палочки. На заболевания людей влияет присутствие в воде и других микроорганизмов, например: возбудителей холеры и тифа, сальмонеллы, а также некоторых одноклеточных организмов, вызывающих заболевания.

Для того чтобы наиболее точно выявить микробиологические условия в период отбора проб очень важно, чтобы все пробы, переданные на микробиологический анализ, отбирались как можно более стерильно.

Микробиологические пробы обычно отбирают в стерильные бутыли с широким горлом и винтовой крышкой, емкостью 200 или 500 мл, сделанные из стекла или нетоксичной пластмассы. Пластиковые емкости необходимо проверить на выделение микроскопических частиц, которые могут помешать подсчету некоторых видов бактерий. Металлические и некоторые резиновые емкости могут вызывать бактериостатический эффект. В завинчивающуюся крышку бутыли должна вставляться прокладка из силиконовой резины, выдерживающей нагревание в автоклаве. Если бутыль с пробкой, то ее горлышко следует покрыть прочной бумагой или алюминиевой фольгой, которые необходимо закрепить с помощью проволочки или эластичной полоски.

По возможности, следует анализировать пробы воды сразу же после отбора. Если немедленная обработка невозможна, хранение проб следует проводить в темном и холодном (при 0 °C) месте. Хранение в таких условиях снижает до минимума размножение и отмирание микроорганизмов в течение 30 часов после отбора пробы. Пробы нельзя замораживать.

Если существует подозрение на то, что содержание тяжелых металлов в пробе, таких, как медь, никель или цинк, превышает 0,01 мг·л<sup>-1</sup>, то их бактериостатическое и бактерицидное влияние следует уменьшить путем добавления 0,3 мл 15 % раствора на 125 мл пробы с изолирующим реагентом, например этилено-диамино-тетрацликновая кислота (EDTA) [4].

Оставшийся хлор редко встречается в природных водах, но если присутствует, его следует удалить путем добавления 0,1 мл 10 % раствора тиосульфата натрия на каждые 125 мл пробы.

### 17.7.2 *Макробиота*

Существует несколько категорий многоклеточных видов, которые должны контролироваться по ряду различных причин.

Рыба, как основа водной пищевой цепочки, является показателем разнообразия условий качества воды, которое определяется ее видом и возрастом. Придонные макробеспозвоночные (организмы, живущие у дна, которые определяются стандартным ситом) являются индикатором современного загрязнения, поскольку имеют низкую подвижность и чувствительность к стрессам. Перифитон — сидячие растения, которые растут, прикрепляясь к поверхностям, или произрастают на подстилке, держась за нее, являются одним из основных производителей водной органики, особенно на мелководьях. Макрофиты — крупные растения, часто с корневой системой, которые покрывают большую часть мелководий и могут препятствовать судоходству и рекреационному использованию водоемов. Планктон — мелкие, свободно плавающие растения и животные. Фитопланктон — главным образом водоросли, рост которых является косвенным показателем концентрации химических питательных веществ. Зоопланктон обитает на всех глубинах, как в проточной, так и в стоячей воде.

Многие из этих организмов могут затруднять обработку воды. Например, водоросли засоряют фильтры, поглощают избыток хлора, плохо влияют на запах и вкус воды, а некоторые даже токсичны. Часть видов может стать переносчиком болезнетворных организмов, таких, как улитки, которые переносят личинки подкожных червей.

Рыбу можно добывать активными способами с помощью невода, трала, электрорыбалки, химикатами, а также на удочку или пассивными с помощью глубоководной сетки, обычной сети, мережи и ловушек.

Макробеспозвоночные могут отбираться различными способами, в зависимости от их среды обитания и других параметров. Кроме сетей используют многопластинчатые пробоотборники и корзинчатые пробоотборники. Их оставляют на определенном месте в течение 4–8 недель, подвешенными на поплавках, а затем осторожно поднимают на поверхность при помощи специальной сетки, расположенной под ними.

Планктон можно отбирать при помощи пробоотборников, описанных в разделе 17.2. Также существуют и специальные пробоотборники, например ловушка планктона Жудай, которая забирает около 5 литров на заданной глубине и отфильтровывает планктон. Этот способ более дорогой и с лодки его использовать затруднительно. Зоопланктон требует либо отбора большого объема пробы, либо можно использовать мерную нейлоновую сеть. Перифитон может отбираться путем установки якорей или плавающих рамок в месте отбора пробы по крайней мере за две недели.

Для макрофитов на мелководьях используют садовые грабли, а на глубинах можно применять драги. При работе с лодки используют шест с ножом или захватным механизмом на конце. Для некоторых целей может быть полезным использование под водой аппаратов искусственного дыхания.

Рекомендуется перед анализом добавлять в пробы специальные красящие вещества, например бенгальский розовый. В последнее время консервированные живые организмы могут быть определены даже персоналом без особой специальной подготовки, поскольку краситель делает их очень заметными на цветном фоне.

Перечень методов, рекомендуемых для консервации образцов макробиоты, приведен в таблице ниже. Некоторые практические специалисты для перифитонов и планктона предпочитают формальдегиду раствор лугола.

### 17.8      **Биохимическая потребность в кислороде**

Сброс загрязняющих органических веществ в водные объекты приводит к естественной очистке воды в результате процесса биохимического окисления. Биохимическое окисление является микробиологическим процессом, в котором загрязняющие вещества используются как источник углерода и растворенный в воде кислород потребляется микроорганизмами. Скорость очистки зависит от многих условий, в том числе от температуры воды и природы органического вещества.

Количество растворенного кислорода, поглощаемое определенным объемом воды в процессе биохимического окисления в течение 5 дней при температуре 20 °C, является мерой качества воды и называется биохимической потребностью в кислороде, или БПК. Процесс окисления не завершается по истечении 5 суток, поэтому для некоторых целей могут использоваться более длительные инкубационные периоды. Принятый период может указываться индексом, например БПК<sub>5</sub> или БПК<sub>20</sub>, а биохимическая потребность в кислороде выражается в миллиграммах кислорода на литр воды.

БПК определяется как общее количество кислорода, необходимое микроорганизмам для окислительного разложения органического вещества. Скорость биохимического окисления пропорциональна количеству органического вещества, сохраняющемуся в воде еще в неокисленном состоянии. Таким образом, показатель БПК используется для оценки величины и скорости процесса раскисления, происходящего в водном источнике или озере, в которые поступают органические вещества. Но, кроме поступления органических веществ, на процесс раскисления могут оказывать влияние и другие факторы, не учитываемые при определении БПК. Например, взвешенный органический материал может оседать на дно реки и медленно перемещаться вниз по течению от места сброса, и уже в сравнительно отдаленных местах оказывать влияние на содержание растворенного кислорода. Присутствие бентоса, корней растений и планктона также влияет на режим растворенного кислорода.

Серьезные осложнения в определении БПК возникают из-за присутствия в воде нитрифицирующих бактерий, которые будут окислять аммиак и органические соединения азота в нитриты и нитраты.

Промышленные стоки также могут создавать трудности из-за потенциально высоких концентраций загрязняющих веществ, которые в естественных условиях могут сдерживать биохимическое окисление в принимающих водах. При таких обстоятельствах проба может нуждаться в разбавлении чистой водой и в посеве добавки из канализационных вод, которые содержат активные микроорганизмы, необходимые для начала процесса биохимического окисления. Могут разрабатываться специальные методы приготовления проб, соответствующие этому анализу.

#### 17.8.1 *Методы измерения*

Созданы различные методы для измерения БПК. Одним из методов, получивших наибольшее распространение, является метод разбавления, а также манометрические методы, которые в основном используются в научно-исследовательских целях, при определенных обстоятельствах могут иметь ряд преимуществ, например для контроля канализационных стоков.

В идеальных условиях анализ пробы должен проводиться сразу же после ее отбора из стока, водного потока или озера. В случаях задержки анализа проба должна храниться при температуре 3–4 °C, чтобы замедлить процессы биохимического окисления.

Если полученное значение БПК пробы больше чем 7  $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$ , то необходимо произвести соответствующее разбавление и/или посев пробы. Избыток растворенного кислорода в пробе при окончании анализа является действительной величиной БПК.

БПК вычисляется по измерению объемного разбавления пробы и разницей между содержанием растворенного кислорода в пробе (раздел 17.5.2.3) до и по истечении пятидневного инкубационного периода. В течение этого периода поддерживается температура в 20 °C, и атмосферный кислород должен быть исключен из пробы, которая для уменьшения эффекта фотосинтеза содержит в темноте. Однако необходимо включить в анализ кислород, поглощенный водорослями.

В пробы, в которых может проявиться нитрофикация и исказить результат, до начала инкубации добавляется аппилмиорен (ATU). В этом случае полученная величина БПК характеризует только карбонатные загрязняющие вещества.

Скорость биохимического окисления можно оценить, анализируя пять идентичных проб БПК в течение 5-дневного инкубационного периода: в первый день измеряя БПК первой пробы, во второй — второй пробы и т. д. График

## Общепринятые методы консервации проб

Биологический анализ — биологические параметры обычно определяются количественно и иногда изменяются от одного биологического вида к другому. Поэтому невозможно составить полный перечень мер предосторожностей, которые следует соблюдать при консервации проб для данного вида анализа. Информация, приведенная ниже, относится только к определенным обычно исследуемым параметрам для различных животных и растительных групп. Следует отметить, что перед выполнением любого детального исследования важно выбрать параметры, представляющие наибольший интерес.

1	2	3	4	5	6
<i>Подсчет и определение</i>					
Природные беспозвоночные	Пластик или стекло	Добавление этанола	Лаборатория	1 год	
Рыба	Пластик или боро-силикатное стекло	Добавление на литр 10 % формальдегида, 3 г декагидрата бористого натрия и 50 мл глицерина	Лаборатория	1 год	Этот анализ желательно выполнять как можно быстрее
Макрофиты	Пластик или стекло	Добавление 5 % формальдегида	Лаборатория		
Перифитон	Пластик или светонепроницаемое стекло	Добавление 5 % нейтрального формальдегида и хранение в темноте	Лаборатория	1 год	
Фитопланктон	Пластик или светонепроницаемое стекло	Добавление 5 % нейтрального формальдегида и хранение в темноте	Лаборатория	6 месяцев	
Зоопланктон	Пластик или стекло	Добавление 5 % формальдегида или раствора лугола	Лаборатория		
<i>Чистая сухая масса</i>					Не замораживать до -20 °C
Природные беспозвоночные					

(продолжение)

Макрофиты	Пластик или стекло	Охлаждение до 2–5 °C	На месте или в лаборатории	24 часа	Этот анализ должен выполняться как можно быстрее и не позднее 24 часов
Перифитон Фитопланктон Зоопланктон Рыба			На месте		
<i>Масса золы</i>					
Природные беспозвоночные		Фильтрация и охлаждение до 2–5 °C	Лаборатория	6 месяцев	
Макрофиты	Пластик или стекло	Заморозка до –20 °C	Лаборатория	6 месяцев	
Перифитон Фитопланктон		Заморозка до –20 °C Фильтрация и заморозка до –20 °C	Лаборатория Лаборатория	6 месяцев 6 месяцев	
<i>Калориметрия</i>					
Природные беспозвоночные	Пластик или стекло	Охлаждение до 2 – 5 °C, затем фильтрация и хранение в сушильном шкафу	Лаборатория	24 часа	Этот анализ желательно выполнять как можно быстрее и, в любом случае, в течение 24 часов
Фитопланктон Зоопланктон					
<i>Тесты на токсичность</i>	Пластик или стекло	Охлаждение до 2–5 °C	Лаборатория	36 часов	Период консервации зависит от метода анализа
		Заморозка до –20 °C	Лаборатория	36 часов	

значений логарифмов, полученных БПК и времени, обычно представляет собой прямую линию. Экстраполяция этой прямой до предельного времени дает точную оценку БПК карбонатных веществ, которая является мерой общего количества кислорода, необходимого для окисления разложившегося органического материала.

### 17.8.2 Точность измерения

Показатель БПК по своей природе является довольно неточным. Для увеличения статистической надежности результатов следует определять среднее значение БПК по результатам анализа нескольких одинаковых проб, проведенного в идентичных условиях (одинаковые разбавления, продолжительность инкубации и посевы, если требуются). Для достижения более высокой точности анализа предложено заменить метод разбавления манометрическим методом. Следует иметь в виду, что эти два метода не всегда дают сравнимые результаты [5]. При помощи манометрического метода можно получить показания биологической окисляемости менее чем за 5 дней.

### Список литературы

1. World Meteorological Organization, 1988: *Manual on Water Quality Monitoring — Planning and Implementation of Sampling and Field Testing*. Operational Hydrology Report No. 27, WMO-No. 680, Geneva.
2. United Nations Environment Programme/World Health Organization/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1992: *Global Environment Monitoring System (GEMS)/Water Operational Guide*. Canada Centre for Inland Waters, Burlington, Ontario.
3. U.S. Geological Survey, 1984: *National Handbook of Recommended Methods for Water Data Acquisition*. Chapter 5: Chemical and physical quality of water and sediments.
4. Huibregtse, K. R. and Moser, J. H., 1976: *Handbook for Sampling and Sample Preservation of Water and Wastewater*. EPA600/4-76-049, Environmental Monitoring and Support Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Section 11.3.2.
5. Montgomery, H. A. C., 1967: The determination of biochemical oxygen demand by respirometric methods. *Water Research*, Vol. 1, pp. 631.

## ГЛАВА 18

### УСЛОВИЯ СОБЛЮДЕНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

#### 18.1           **Общая практика**

[A00]

Гидрологические измерения выполняются в широком диапазоне экстремальных условий, и многие из них потенциально опасны для персонала, выполняющего их. Знание этих опасностей и мер, благодаря которым они могут быть сведены к минимуму, необходимо для персонала гидрологических станций. Ряд организаций разработали детальные информативные руководства по технике безопасности. Всем инженерам, специалистам в области гидрологии и техническому персоналу рекомендуется ознакомиться с этим материалами.

Каждая страна или государство должны иметь стандарты и практику по мерам безопасности, а также законы и правила, регулирующие их. Они могут охватывать многие виды деятельности, рассматриваемые в данной главе, и весь персонал должен быть ознакомлен с ними и учитывать их в своей деятельности.

Каждый член коллектива несет ответственность перед собой и своими коллегами за максимально возможное соблюдение мер безопасности во время работы. Организации несут ответственность за распространение предупреждений об опасных ситуациях и за разработку мер, направленных на сведение их к минимуму, а также за обеспечение соответствующего уровня безопасности оборудования и за подготовку персонала [1–4].

#### 18.2           **Меры безопасности на гидрометрических станциях с самописцами**

##### 18.2.1       **Подходы к постам**

Хорошо сделанные пешеходные дорожки, лестницы, тропинки и прочее очень важны для безопасности на крутых речных берегах. Они нужны, чтобы обеспечить безопасные подходы как в заболоченных, так и в сухих местах. Когда начинают строительство станции, прежде всего следует сделать подходы к ней.

##### 18.2.2       **Платформы**

Высокие платформы и переправы должны иметь нескользкую поверхность, например, проволочную сетку, натянутую над деревянной обшивкой. Следует также устанавливать перила.

### 18.2.3 ***Колодцы***

Некоторые станции, регистрирующие уровень воды, имеют глубокие колодцы, в которые необходимо иногда спускаться для поддержания их в рабочем состоянии. Существует опасность возможного падения или отравления газом. Все колодцы должны, по крайней мере, иметь страховочную веревочную связь или лебедку, установленную таким образом, чтобы поднять человека, упавшего на дно колодца.

Человек, спускающийся в колодцы, глубина которых значительна и которые подозреваются на предмет содержания в них газа, должен надеть привязные ремни, прикрепленные к спасательной системе и иметь одного или нескольких человек наверху для страховки. Следует также надевать защитную каску.

Опасность соскальзывания может быть снижена благодаря сооружению надежных лестниц, а также благодаря сохранению всего оборудования в хорошем состоянии. В колодцах может присутствовать ряд газов, включая углекислый, метан и сернистый. Они образуются в результате разложения органических веществ и могут вытеснять воздух, что ведет к недостатку кислорода, а также к токсичности и воспламенению. Эти опасные явления могут иметь место даже при очень низких концентрациях, а реакция на газ может быть весьма быстрой, так как человек теряет сознание даже после одного или двух вдыханий токсичного газа.

Меры предосторожности включают: надежную вентиляцию во всех колодцах глубиной более 6 метров, открытие крышки колодца для вентиляции перед спуском, применение вытесняющих газ факелов или задымливания, применение оборудования по слежению за уровнем газа, а также определенный порядок использования страховочных средств и спасательного оборудования. Все усилия следует направить на то, чтобы не допустить появления органических веществ в колодце или на удаление их.

### 18.3 ***Меры предосторожности при работе с мостов***

Главной опасностью при выполнении измерений или отборе проб с мостовых переправ является столкновение с проходящим транспортом или падение с моста в результате большой нагрузки или большого веса подвешенного оборудования.

#### 18.3.1 ***Опасность со стороны транспорта***

Достаточную степень безопасности могут обеспечить мосты с пешеходным тротуаром. В остальных случаях необходимо предупреждать водителей с помощью специальных сигналов, и, если это приемлемо с практической точки зрения, используя специальные мигающие фонари. Персонал должен быть одет в флюоресцирующую или ярко-окрашенную одежду, можно также установить переносные транспортные знаки, чтобы отвести поток транспорта от зоны работ. Необходимо получить разрешение местных властей на проведение работ, мешающих транспортному потоку.

### 18.3.2 *Опасность со стороны подвесного оборудования*

Потенциальная подъемная сила, действующая на оборудование, например на измерительные рамы, означает, что оно имеет склонность к опрокидыванию с моста, когда подвесное оборудование, или его части, начнут падать в реку или на проходящие внизу лодки. Особые меры предосторожности против такой опасности принимаются во время паводков.

Измерительные краны или рамы необходимо хорошо уравновесить или прикрепить. Должен вычисляться опрокидывающий момент моторизованных кранов, а установленные специальные крепления присоединяются к оборудованию, чтобы, при необходимости, предотвратить опрокидывание. При работе на судоходных водных объектах все имеющиеся тросы и кабели должны отмечаться специальными маркировочными флагами.

## 18.4 Меры безопасности во время проведения измерений вброд

### 18.4.1 *Общие положения*

В тех случаях, когда возможно пересечь реку вброд, гидрологические измерения могут проводиться более просто и непосредственно, чем в других случаях. Однако возникает определенная опасность при слишком большой глубине или скорости потока.

### 18.4.2 *Оценка ситуации*

Для того чтобы принять решение в конкретной ситуации о возможности проведения измерений вброд, персоналу необходимо соблюдать меры предосторожности и иметь определенный опыт. В качестве основного руководящего правила принимают следующее: если произведение глубины в метрах на скорость в  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$  превышает 1,0, то поток небезопасен для измерений вброд. Форма человека и его одежда также влияют на выбор способа измерений. Специальные болотные сапоги имеют большее сопротивление, чем голые ноги или гидрокостюм.

### 18.4.3 *Применение спасательных жилетов*

Правильно пригнанные спасательные жилеты соответствующего размера и конструкции обычно следует надевать: при резких колебаниях течения и уровня воды, когда существует вероятность таких явлений или когда условия могут стать опасными по другим причинам.

### 18.4.4 *Меры безопасности при использовании каната или размеченного троса*

При выполнении измерений расхода для поддержки полезно использовать канат или трос, натянутый поперек реки. Он также может служить в качестве разметки для измерения по нему расстояния. Его следует надежно закрепить с обеих сторон для того, чтобы он выдерживал вес человека и давление течения реки.

#### 18.4.5 *Методика перехода в брод*

Следует выбирать места с проходимой глубиной, скоростью течения и русловым материалом, планировать передвижение по диагонали вниз по течению и продвигаться в сторону противоположного берега мелкими шагами, при этом лицо должно быть обращено к противоположному берегу и вперед по течению. Для промеров глубин и поддержки полезно использовать гидрометрическую штангу (без вертушки). Желательно иметь опору, которая находится выше по течению, не терять самообладания и не спешить. Если переход становится слишком трудным, следует вернуться, отступая назад до тех пор, пока не будет возможности повернуться и поискать более легкий путь.

#### 18.4.6 *Поведение в случае падения*

Если вас начинает сносить течением, нужно двигаться по течению и держать направление к берегу, работая руками и отталкиваясь ногами. Если дно каменистое, следует избегать естественной реакции и не пытаться опереться о дно ногами, поскольку они могут застрять между камнями. Если же это произойдет, течение легко может затащить человека под воду, что может привести к фатальному исходу.

Болотные сапоги нужно сбросить на глубине, когда возникает необходимость проплыть некоторое расстояние. Лучший способ для этого — свернуть их до бедер и сдернуть их поочередно с каждой ноги. Следует избегать выворачивания их наизнанку даже там, где мелко и они мешают. Ремни на сапогах должны быть застегнуты таким образом, чтобы их можно было легко расстегнуть.

Имеется возможность удержать в сапогах воздух, повысив тем самым плавучесть, либо надев тугу затянутый вокруг талии ремень, либо быстро приняв позицию для плавания на спине с поджатыми коленями.

#### 18.4.7 *Ответственность*

Сотрудники не обязаны переходить реку в брод в ситуациях, когда они не чувствуют себя в безопасности. Опыт и смелость являются важными факторами, но всегда следует соблюдать осторожность.

### 18.5 *Меры предосторожности при работе с лодок*

#### 18.5.1 *Общие положения*

Для гидрологических целей используется много различных типов лодок, и к каждой предъявляются свои требования по безопасности. Они всегда должны соблюдаться, так как любое плавание на лодке связано с опасностью. Моторист должен быть ознакомлен со всеми операциями и действиями в непредвиденных ситуациях, а также с правилами управления лодкой при предстоящих работах. Судно должно быть исправно, отвечать требованиям экстремальных условий и не должно быть перегружено.

### 18.5.2 *Спасательные жилеты и средства безопасности*

Во время работы на маломерных судах всегда надеваются спасательные жилеты; на крупных — они должны всегда иметься на борту в достаточном количестве для пассажиров и членов экипажа.

На всех лодках необходимо иметь полный комплект средств безопасности, соответствующий типу лодки и возможным экстремальным условиям. Этот комплект включает либо все, либо часть из перечисленного: спасательные жилеты, световые ракеты, спасательные пояса, черпаки, откачивающие насосы, ремни безопасности и наборы для выживания в экстремальных условиях. При любой практической возможности следует устанавливать соответствующее оборудование радиосвязи. На каждой лодке должен иметься прикрепленный к носу канат для швартовки и буксировки, а также соответствующий якорь с канатом, длина которого должна быть достаточной для исследуемых глубин. На борту должен иметься запасной двигатель и запасное топливо, если это практически осуществимо.

### 18.5.3 *Применение канатов*

Измерительные ленты и канаты часто используются для измерения ширины реки. Они должны быть соответствующей длины, и быть изготовлены из материала, который не растягивается и способен выдержать навешенные флаги. Однако чем канат легче, тем меньшее усилие необходимо для его установки и тем легче и безопаснее работать с ним.

Канаты другого типа устанавливаются для причаливания лодки в точке измерения, и в этом случае действуют те же факторы. В зависимости от скорости течения значение этих факторов возрастает. На судоходных водных объектах все канаты должны быть размечены ярко окрашенными метками через такие интервалы, чтобы канат был хорошо виден. Нельзя доверять только яркому цвету, поскольку многие из людей не различают цветов. Когда возможно, лодки работающие с такими канатами, следует снабжать яркими сигнальными огнями. Местные власти и все службы, работающие на реке, должны быть предупреждены об опасности.

Такие канаты нельзя оставлять незакрепленными, а персонал, работающий на створе, должен иметь специальный режущий инструмент для того, чтобы, при необходимости, предотвратить несчастный случай.

### 18.5.4 *Использование шлюпок*

На реках следует гребти поперек, по диагонали вверх по реке, против течения, используя способ паромной переправы. В этом случае гребец обращен лицом вниз по реке, и поэтому рулевое управление вблизи препятствий можно отпускать.

Персонал должен уметь грести, весла должны быть достаточной длины (приблизительно полторы ширины расстояния между уключинами), а уключины должны быть надежными, закрытого типа. Относительно безопасны, за счет конструктивной плавучести, шлюпки с заполненными воздухом емкостями. В случае переворачивания, их можно привести в нормальное положение при помощи веревки, привязанной к одной из уключин; для этого необходимо, находясь с противоположной стороны, потянуть за веревку и перевернуть лодку обратно. Алюминевые лодки являются легкими, прочными и легко управляемыми. Небольшой вес делает их зависимыми от ветра, и их нельзя использовать в ветреную погоду. Если такие лодки заливает водой, два человека могут удалить большую ее часть путем опускания кормы до тех пор, пока нос не освободится от воды, а затем быстро поднять корму. После этого можно вычерпать воду. Когда вода частично вычерпана, можно закончить откачу с кормы при помощи второго человека, который будет опускать нос. Деревянные и пластиковые лодки часто слишком тяжелы для использования этого метода, но осадка их меньше, даже при заполнении водой, что позволяет использовать черпак.

#### 18.6 Меры безопасности при работе с канатных переправ

Перед использованием любой канатной переправы следует проверить ее состояние, обратив внимание на следы от якорей, провисание, следы вандализма или другие повреждения кабеля, опор, якорей, канатного механизма и двигателя. Укомплектованным канатным переправам обычно требуются регулярные проверки и сертификат пригодности, который не должен быть просрочен.

При использовании канатных переправ весь персонал должен быть проинструктирован и знать, что никогда нельзя прикасаться к канату руками во время остановки или движения, так как может возникнуть опасность попадания под колеса движущейся тележки. Следует применять наиболее пригодные тягловые устройства. Максимальная проектная нагрузка канатных переправ не должна превышаться и следует перерезать канат специальными ножницами при его провисании до уровня реки. Канат следует перерезать вблизи лебедки, а персонал должен крепко держаться за тележку во время отдачи.

Неуправляемые канатные переправы обычно снабжены электрическими или ручными лебедками, находящимися на берегу, и для их надежного закрепления нужен привод и тормоз. При пользовании любыми лебедками необходимо подвязать длинные волосы и свободную одежду, чтобы избежать запутывания.

Все канаты и тросы должны быть установлены на речном и воздушном транспорте (особенно вертолетном) в соответствии с правилами безопасности. Когда необходимо, их следует размечать долговременными и хорошо различимыми отметками, чтобы они были видны операторам и пилотам, работающим на водном объекте.

18.7       **Меры предосторожности при работе с ручным оборудованием**  
18.7.1      **Топографическая съемка**

Наземные электрические провода представляют опасность при использовании для топографической съемки штативов, особенно металлических. Штативы должны иметь знаки, расположенные с обратной стороны на уровне глаз, предупреждающие об их опасности.

18.7.2      **Цепные пилы**

Работающие должны быть одеты в подходящую, хорошо пригнанную одежду и иметь для безопасности каску, защиту для глаз и ушей, устойчивую обувь со стальными носками.

Запускать пилу следует не отрывая ее от земли, и резку производить в устойчивом положении, когда proximity нет препятствий и других людей, и имеется безопасный отход от падающего дерева и веток.

Может произойти отдача, если цепь отскочит вверх, натолкнувшись на препятствие. Она может отскочить гораздо быстрее реакции человека, который в этом случае может ее отпустить. Обычно в такой ситуации калечат левую руку. Для того чтобы уменьшить вероятность таких случаев, работник должен удерживать рукоятку прямым запястьем, прочно упираясь ногами в землю, резку производить на максимальных оборотах и держать переднюю часть пилы подальше от препятствий.

18.7.3      **Электрооборудование**

Все электрооборудование, используемое на открытом воздухе или во влажных условиях, должно питаться от изолированного трансформатора или заземленного электровыключателя. Все электрические провода должны быть натянуты таким образом, чтобы предотвратить их повреждение и контакт с водой. Провода должны содержаться в полной исправности, и любые повреждения необходимо немедленно устранять.

Электроцепи нельзя перегружать, а их ремонт должен выполняться только квалифицированными специалистами-электриками.

18.7.4      **Электроинструменты**

Электроинструменты должны использоваться только по своему назначению и всегда в соответствии с инструкцией изготовителя. Персонал должен быть правильно проинструктирован по всем вопросам их использования. Использование некоторых видов пневмо- и электроинструментов может потребовать разрешения государственных организаций. Защитные очки должны всегда использоваться при работе с режущим, шлифовальным, дробильным и сверлильным оборудованием.

### 18.7.5 *Защитная одежда и средства защиты*

Персонал должен быть снабжен всеми средствами защиты в зависимости от условий работы и используемого оборудования.

### 18.7.6 *Радиоактивное оборудование*

Некоторые приборы, такие как измеритель влажности почвы и геофизические приборы, имеют встроенные радиоактивные источники. Эти приборы должны быть соответствующим образом промаркированы, а работать с ними и хранить их необходимо в соответствии с правилами пользования. Радиация, излучаемая источником, может быть опасной для здоровья. Обычно радиоактивный материал запечатан в капсулу из нержавеющей стали. Являясь частью оборудования, капсула, как правило, окружена поглощающим радиацию материалом, таким как пластик, сталь или свинец. Когда прибор выключен, необходимо удостовериться, что источник находится внутри этого поглощающего материала. Ни при каких обстоятельствах нельзя касаться капсулы руками, а в случае необходимости использовать щипцы с длинными ручками или подобное оборудование.

Сохранение хорошей дистанции обычно является достаточной мерой для надежной защиты. Некоторые источники имеют значительное излучение только на расстоянии ближе 10 сантиметров, а другие на гораздо большем. Необходимо, чтобы персонал знал тип и другие особенности используемого источника, и чтобы он был ознакомлен с рекомендуемыми процедурами и инструкцией для этого источника.

Все инструкции, процедуры и правила должны неуклонно соблюдаться, а с оборудованием всегда следует обращаться крайне аккуратно.

### 18.7.7 *Вопросы безопасности при наблюдении за подземными водами*

Насосы и помпы для отбора проб, тестирования или исследования скважин следует использовать в соответствии с мерами безопасности, предусмотренными для этого типа оборудования. Важно соблюдать меры безопасности около бурового оборудования, а также принимать во внимание наставление по буровой практике.

Следует избегать спуска в колодцы большого диаметра для отбора проб из-за возможного присутствия газов, как описано в разделе 18.2.3. При работе наверху колодцев большого диаметра следует надевать ремни безопасности.

### 18.8 *Меры предосторожности при работе с химикалиями*

Все химикалии, подобные тем, что используются для консервации проб воды, чистящие жидкости и трасеры, требуют тщательного хранения и осторожного обращения. Необходимо избегать вдыхания паров или непосредственного контакта химических веществ с кожей, глазами и одеждой. Любая пролитая жидкость должна немедленно удаляться путем разбавления

большим количеством воды, нейтрализацией или протиркой с последующим удалением использованного для этого материала. Для этих целей необходимо иметь в наличии перчатки, фартуки и пригодные для чистки материалы.

Не следует продувать трубы ртом, за исключением случаев, когда питьевая вода содержит только обычные вещества. При попадании на кожу кислоты, щелочи и других едких веществ, ее нужно немедленно промыть обильным количеством воды. Когда есть возможность, можно использовать нейтрализующие растворы, после которых необходимо вторично промыть пораженное место мылом. Если какое-либо химическое вещество попало в глаза, следует немедленно промыть их большим количеством воды. Кроме того, необходимо промыть места вокруг глаз. Во время промывки нужно держать веки открытыми. Глаза необходимо промывать в течение нескольких минут. При всех повреждениях глаз следует обращаться к специалистам.

Необходимо предпринимать меры предосторожности, так как вода может содержать разнообразные ядовитые и бактериально опасные вещества. Они могут быть извлечены из широкого круга источников, таких как сточные воды или сбросы очищенных стоков, насыщенные растворы из заполненных земных пустот, утечки из емкостей для хранения, промывки емкостей для сельскохозяйственного опрыскивания, а также разливы химических и нефтяных продуктов.

Следует считать подозрительными любые нехарактерные проявления цвета, пленочных образований, пен, запахов или паров, предприняв в этом случае соответствующие меры предосторожности. Многие токсичные вещества могут проникать через кожу, а в случае паров — через легкие.

Меры предосторожности включают использование перчаток, водонепроницаемой спецодежды и фартуков, головных уборов и защиты для глаз. При имеющейся возможности присутствия ядовитых паров, работать следует только в хорошо вентилируемых помещениях или с использованием автономной аппаратуры искусственного дыхания. Пищевые продукты следует хранить отдельно от проб и зон их обработки. Необходимо всегда тщательно мыть руки перед принятием пищи. Запрещается курить во время обработки проб или находясь рядом с ними. Когда имеется подозрение на присутствие горючей смеси, источники света и тепла следует держать на расстоянии и хранить пробы в специальных взрывобезопасных холодильниках.

При измерении или отборе проб воды с высокой концентрацией ядовитых веществ, например насыщенные растворы из заполненных земных пустот или при подозрении на радиоактивность, требуются специальные условия и консультация соответствующих специалистов.

## 18.9        **Специальные меры предосторожности в условиях холода**

### 18.9.1      **Гипотермия (переохлаждение)**

Гипотермия — это понижение температуры тела в результате переохлаждения, что приводит к упадку жизненных и физических сил. В основе гипотермии лежит

низкая температура, усугубляемая мокрой одеждой, ветром, состоянием голода и истощением. Она часто случается в условиях, когда ее ранние симптомы нельзя распознать.

Ранние симптомы гипотермии могут включать следующие признаки: усталость, холод и истощение, отсутствие интереса, летаргия, неловкость и неуверенность в движениях, несвязность речи и нелогическое поведение. Наличие этих признаков требует немедленного медицинского вмешательства, а также немедленных действий по защите от дальнейшей потери тепла и разогреванию. Пострадавший не может позвать на помощь, а также может отрицать, что существует какая-либо проблема. Более поздние симптомы, которые указывают на серьезную необходимость принятия срочных мер, проявляются в явном недомогании, прекращении дрожи, несмотря на холод, коллапсе и бессознательном состоянии.

Когда симптомы становятся очевидными, следует немедленно начать разогревание. Тело пострадавшего, по всей вероятности, не будет способно генерировать достаточно тепла для этого, поэтому тепло следует прикладывать постепенно к торсу, а не к конечностям. Нагревание конечностей увеличит прилив крови к этим наиболее охлажденным частям тела и еще больше понизит температуру самого тела.

При разогревании необходимо иметь укрытие, сухую одежду, изолированность (например спальный мешок), а также тепло, прикладываемое к жизненно важным органам тела. Этого можно достичь путем тесного контакта с компаньоном в спальном мешке. Применяется и растирание без спирта или быстрое прогревание. Необходимо также теплое сладкое питье, но только не для людей в бессознательном состоянии.

Благодоря прогреванию и укрыванию больной в основном быстро приходит в себя, но возвращение в холодные условия может вызвать коллапс. Полное восстановление может потребовать вплоть до двух дней.

Можно предотвратить гипотермию, используя соответствующее укрытие и соответствующую тепло- и ветрозащитную одежду. Следует избегать длительного пребывания в сырости и иметь запас пищи и укрытие, например тент или палатку.

### 18.9.2      **Обморожение**

Переохлаждение при сильном морозе вызывает обморожение незащищенных частей тела, например: пальцев на ногах и руках, ушей и носа. Пораженные участки тела немеют, приобретают белый цвет и восковой вид. Легкое поверхностное обморожение может быть снято прикладыванием руки или другой части тела, без растирания. Нельзя разогреваться используя прямое нагревание или растирание, нельзя также давать спирт. Более серьезные случаи обморожения требуют медицинского вмешательства.

Меры предосторожности заключаются в ношении соответствующей обуви, защите рук, лица и ушей, а также в том, чтобы избегать ношения тесной одежды и

обуви, сохранять руки и ноги сухими и постоянно контролировать признаки онемения. Постоянное движение или сгибание пальцев рук и ног для стимуляции кровообращения является кратковременным средством, которое следует использовать, чтобы уменьшить переохлаждение.

#### 18.9.3 *Работа на льду рек и озер*

Поездки и работа на льду должны выполняться с особой осторожностью и с сохранением минимальной нагрузки. В случае, когда лед провалился, необходимо положить руки на твердую поверхность льда, подтянуть тело, отползти вперед на животе до тех пор, пока бедра не окажутся на льду, а затем быстро перекатиться на лед. Продолжать перекатываться до безопасного места. Если лед очень тонкий и не выдерживает вас, используйте способ подпорок, ломая лед одной рукой и одновременно поддерживая себя с помощью другой.

Спасатели должны попробовать добраться до пострадавшего при помощи шеста, лодки или веревки. Выходить на кромку льда следует только в крайних случаях. Если это необходимо, держите длинный шест или скользите по льду в положении лежа. При наличии веревки, для безопасности, закрепите ее на какой-нибудь опоре. Необходимо как можно быстрее выслушать и обогреть человека, который провалился под лед, для предотвращения гипотермии. К значительному риску могут привести и измерения под льдом. Просверливание лунок или вырубка майн могут существенно уменьшить толщину льда. По всей вероятности, лед на реках имеет переменную толщину, и ее нельзя оценивать по толщине льда у берегов. Зоны с порогами или большой турбулентностью, например у опор моста, скорее всего имеют более тонкий лед за счет движения воды. При передвижении по реке, покрытой льдом, желательно проверять лед ледорубом через каждые несколько шагов. Твердый лед издает звонкий звук, а мягкий — глухой. При любых сомнениях относительно толщины льда следует использовать спасательную веревку и иметь партнера на берегу со спасательным оборудованием.

#### 18.9.4 *Работа в горных районах*

Погода в горных районах очень изменчива и создает проблемы при несоблюдении осторожности или плохом оснащении. Чем холоднее климат, тем больше проблем и требуется больше одежды, запасов пищи и средств, обеспечивающих безопасность.

Персонал должен быть опытным или находиться вместе с теми, кто имеет такой опыт, планы маршрутов должны быть известны соответствующим специалистам, которые, в случае необходимости, могли бы оказать первую помощь. Следует иметь специальную водонепроницаемую, ветрозащитную и теплую одежду, а также достаточный запас продуктов и спасательное снаряжение для экстренных условий. При работе с вертолета необходимо, чтобы каждый член отряда имел

такое снаряжение даже тогда, когда он отлучается на очень короткое время, так как облачность или другие погодные условия могут помешать его возвращению.

Нельзя рисковать и ступать на твердый снег без ледоруба, страховочной веревки, шипов, кроме того, следует знать, как ими пользоваться. Важно соблюдать осторожность на случай лавины, особенно сразу после выпадения осадков, знать различные признаки нестабильных снежных условий, а также стараться учесть советы более опытных товарищей. Независимо от снежных условий следует избегать передвижения или спуска по крутым склонам. При попадании в лавину следует предпринять все усилия, чтобы оставаться наверху и избежать быть засыпанным снегом, закрыть нос и рот, чтобы предотвратить удушье, и, если вас засыпало, попробуйте создать воздушное пространство перед лицом и грудной клеткой.

#### 18.9.5 *Выживание в холодной воде*

Гипотермия очень быстро наступает при попадании в холодную воду. Ее наступление может быть замедлено при соблюдении спокойствия и наличии одежды, уменьшающий приток воды к телу, который приводит к потере тепла. Поскольку потеря тепла в воде при одинаковой температуре идет намного быстрее, чем на воздухе, можно сохранить тепло, если постараться, насколько это возможно, высунуться из воды.

Желательно, чтобы уменьшить потерю тепла, держать голову над водой, и свести ноги вместе в области паха. Незаменимым в таких ситуациях является спасательный жилет, который также обеспечит защиту внутренних органов. Группе людей следует держаться вместе, прижавшись грудью друг к другу, чтобы уменьшить потерю тепла. Дети должны находиться в центре такой группы.

Лечение заключается в прогревании в первую очередь жизненных органов, до разогрева конечностей, как описано в разделе 18.9.1.

#### 18.10 *Специальные меры предосторожности в жарких условиях*

##### 18.10.1 *Тепловой удар (гипертермия)*

Тепловой удар происходит при высокой окружающей температуре, что приводит к повышению температуры тела до 40 °C и даже выше. Неблагоприятная реакция людей на жару не у всех одинакова и зависит от их способности акклиматизироваться, тренированности и, самое важное, от гидратации организма. Вначале, при чрезмерном нагревании, тело отдает тепло, главным образом, в результате испарения воды через потоотделение и дыхание. Если выделение воды прекращается, механизм охлаждения тормозится и происходит перегрев. Его симптомы заключаются в: головной боли, ознобе, тошноте, частом пульсе, мышечной боли, потере координации, и, что более опасно, в состоянии бреда и конвульсиях. Если не предпринять необходимых мер, неизбежен летальный исход.

Лечение состоит в незамедлительном охлаждении, для этого переносят пострадавшего в тень, снимают одежду, обрызгивают холодной водой, энергично обмывая при этом.

Меры предосторожности заключаются в том, чтобы поддерживать физическое здоровье, умеренный мотив, регулярно и часто пить воду небольшими порциями, отказаться от алкогольных напитков и кофе, а также избегать работы в самые жаркие часы, носить легкую одежду светлых тонов и свободного покроя и шляпы с полями и, кроме того, добавлять соль в пищу.

### 18.10.2 *Обгорание на солнце*

Излишнее нахождение на солнце может привести к серьезному обгоранию, особенно у светлокожих людей. Оно вызывает сильную боль и повреждение кожного покрова и может привести к тепловому удару. Длительное нахождение под воздействием солнечных ультрафиолетовых лучей может вызвать рак кожи, особенно у людей со светлым цветом кожи.

Меры предосторожности заключаются в ношении защитной одежды и, особенно, головного убора. Следует наносить на кожу солнцезащитный крем. Необходимо ограничить время ежедневного нахождения на солнце, постепенно увеличивая его, чтобы выработать у организма защитный рефлекс.

## 18.11 *Передвижение и транспорт*

### 18.11.1 *Общие положения*

Существует очень много видов передвижения и типов транспортных средств, которые применяются при гидрологических работах и которые различаются в соответствии с типом местности, климатом и маршрутами передвижения. Вопросы безопасности, которые учитывают все разнообразие этих факторов, включают широкий круг проблем и не ограничиваются только гидрологическими работами. В этой связи, они лишь кратко затрагиваются в настоящем *Руководстве* и гидрограмм настоятельно рекомендуется обратиться к наставлениям и рекомендациям для местных условий и типов транспортных средств.

### 18.11.2 *Вертолеты*

С вертолетами на земле обычно связан шум и сильный ветер, заслоняющие опасность, которую представляют их основной и хвостовой винты. Они привели к гибели и травмам многих людей. Нельзя приближаться к вертолету или удаляться от него без разрешения пилотов и вне их видимости. Подходить и уходить от воздушного судна следует пригнувшись и на максимальном расстоянии от основного винта, обходить вокруг хвоста запрещается.

Персонал должен находиться вдали от посадочной площадки и не оставлять на ней оборудование. Все снаряжение и незакрепленные предметы

следует полностью убрать из зоны воздушной волны вертолета или сильно прижать к земле. Длинномерные предметы, например геодезические рейки, следует подносить горизонтально на уровне талии, чтобы избежать столкновения с винтами. Воздушное судно должно загружаться под наблюдением пилота, внимание которого следует обратить на опасные грузы, например аккумуляторные батареи или горючие материалы.

Линии электропередач и канатные дороги представляют особую опасность для вертолета, и персонал должен поделиться своими знаниями с пилотом о их местонахождении, а также помочь в обнаружении других подобных опасностей.

#### 18.11.3 *Моторизованный транспорт*

Для проведения многих гидрологических работ часто необходимо передвижение на моторизованном транспорте, который потенциально представляет серьезную опасность. Весьма распространены дальние поездки по внутренним дорогам, которые создают дополнительную опасность на шоссе.

Самой распространенной причиной аварии является превышение скорости. Это также относится и к внутренним дорогам, которые часто узки и извилисты и имеют плохое покрытие. Хорошие водители управляют с плавным ускорением, большой осторожностью и тормозят спокойно, они внимательны к транспорту, пассажирам и к другим участникам дорожного движения.

#### 18.12 *Набор для выживания и неприкосновенный запас*

Весь персонал в удаленных районах должен иметь набор для выживания в экстремальных условиях. Состав этого набора будет сильно отличаться в зависимости от климата, условий и вида передвижений, но в него всегда должны входить продукты, вода, оборудование для приготовления пищи и обогрева, укрытие, например тент или палатка, спальный мешок, фонарь, медикаменты, специальная одежда на случай ухудшения погодных условий и сигнальные средства, например зеркало, световые ракеты и двусторонняя радиосвязь.

Весь персонал, работающий в поле, должен пройти курс подготовки по оказанию первой помощи, и каждого следует снабдить соответствующим набором и руководством по его использованию.

На занятиях должны рассматриваться следующие вопросы: искусственное дыхание, массаж сердца и легких, приведение в сознание, остановка кровотечения, оказание помощи при переломах, состоянии шока, повреждении глаз, отравлении и ожогах.

#### 18.13 *Другие виды опасности*

Полевой персонал должен знать и соблюдать осторожность в отношении других видов опасностей, встречающихся при их работе. К ним, например, относятся:

ядовитые растения, жалящие и кусающие насекомые, опасные животные, зыбучие пески, магнитные бури и др. Кроме этого, значительный ущерб здоровью может нанести купание или потребление воды из неизвестных источников. В некоторых районах имеется вероятность подвергнуться нападению других людей, занимающихся противозаконной или военной деятельностью. Персонал никогда нельзя подвергать такому риску, и ответственность за это несет работодатель.

#### Список литературы

1. Corbett, P., 1986: *Hydrographers' Field Safety Manual* (draft). Report No. T.S. 89.002, Department of Water Resources, New South Wales Government, Australia.
2. Curry, R. J. and Fenwick, J. K., 1984: *Hydrologists' Safety Manual*. Water and Soil Miscellaneous Publication No. 64, National Water and Soil Conservation Organisation, Wellington, New Zealand.
3. Environment Canada, 1983: *Sampling for Water Quality*. Water Quality Branch, Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa.
4. U.S. Geological Survey, 1989: *U.S. Geological Survey Handbook 445-1-H*, Reston, Virginia.



# ЧАСТЬ С

## СБОР, ОБРАБОТКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

### ГЛАВА 19

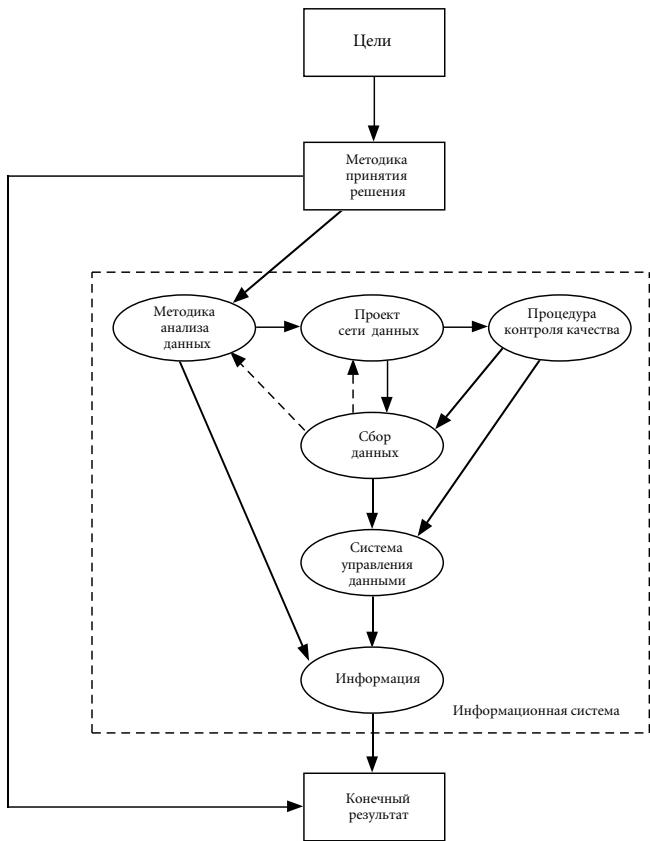
#### РОЛЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

##### 19.1        **Информационные системы**

В части В настоящего *Руководства* сделан упор на полевые работы в области оперативной гидрологии. Однако полученные в результате таких работ данные имеют важное значение только тогда, когда они быстро и надежно переданы их потенциальным потребителям. Для того чтобы обеспечить концептуальную основу разработки верных подходов и гарантировать правильность и своевременность сбора и передачи информации, оперативную гидрологию внутри данной гидрологической службы можно рассматривать как некоторую информационную систему. На рисунке ниже изображены элементы гидрологической информационной системы. Идеальный случай, когда в основе информационной системы лежит характерная последовательность действий и решений, которая начинается с изучения общей проблемы, и в итоге внедряет принятые по ней решения с максимальным положительным эффектом.

На рисунке приведена последовательность действий на стадии, когда обобщенная проблема преобразована в конкретную задачу или ряд задач, ответы на которые впоследствии понадобятся при принятии определенного решения. После того как задачи поставлены, производится выбор методов и технологий для их решения, чтобы правильно назначить конкретных исполнителей. Выбор методов решения включает: определение необходимых переменных и параметров, описывающих как гидрологические, так и социально-экономические аспекты данной проблемы; детальную проработку, при помощи которой переменные группируются, и определяется последовательность действий; определение методики, с помощью которой будут рассматриваться присущие переменным и параметрам неопределенности. При использовании этих методов принятия решения, следует постоянно помнить, что разработчик информационной системы может специально разделить процедуры, которые используются при анализе гидрологических данных. Методы анализа гидрологической информации могут включать одиночную модель или комплекс моделей, которые позволяют оценивать вероятностный, стохастический или детерминированный характер тех или иных гидрологических явлений. В части С настоящего *Руководства* рассмотрены многие из этих вопросов.

При идеальной постановке задачи, каждый из описанных выше этапов должен предшествовать разработке гидрологической сети. При проектировании сети



Компоненты гидрологической информационной системы

наблюдений нужно знать ответы на следующие вопросы: что нужно измерять; где измерять; когда измерять; с какой точностью измерять. Некоторые из этих проблем кратко рассмотрены в части В. Более широко вопросы проектирования сети представлены в главе 20.

На рисунке пунктирными стрелками показано, что стадия последовательности, на которой непосредственно начинается сбор данных, может вернуться к исходным позициям. Предшествующие этой стадии ступени были основаны на определенном уровне знаний об интересующих гидрологических условиях. По мере накопления данных этот уровень возрастает, вследствие чего могут быть

приняты новые технологии анализа данных и спланирована новая сеть наблюдений. Руководство по сбору данных представлено в главе 21.

Из рисунка видно, что контроль качества является неотъемлемой частью информационной системы, и сопровождает все стадии, начиная с полевых работ до распространения данных и информации. Из-за широты этой проблемы рекомендации по контролю качества можно найти в различных разделах от 21 до 25 главы.

Рассмотрение информационной системы будет неполным без упоминания о системе управления данными. Информация, входящая в комплексную систему по управлению данными, доступна не только начальному кругу потребителей, но и для множества других потребителей, которых невозможно заранее предвидеть. Однако комплексность достигается в результате больших затрат. Первая часть стоимости состоит в том, что широкий выбор, присущий комплексной системе, приводит к затруднениям в ее использовании, так как требует большей практической подготовки.

Эта часть стоимости может быть снижена с помощью создания дружественных для пользователя систем. Второй фактор стоимости — возможные потери информации в результате комплексности. Вследствие того что система управления данными не может одновременно удовлетворять разнообразным потребностям потребителей, она вынуждена идти на компромисс, который обычно приводит к сокращению полноты данных и к потере некоторых их свойств. Для того чтобы уменьшить эти потери, в комплексную центральную систему должны быть подключены подсистемы, которые содержат дополнительные данные специального назначения. Подобные подсистемы рассмотрены в главах 24 и 25.

Конечный продукт информационной системы получается в результате обработки данных по той же технологии анализа, которая изначально была решающей при проектировании сети наблюдений. Изображенная на рисунке последовательность достигает кульминации посредством включения гидрологической информации в процесс принятия решений, для которого она предназначена, с тем чтобы получить оптимальный результат. Ключ к достижению этого результата — согласованность между технологией принятия решения, методикой анализа данных и сетью наблюдений.

Хорошо спроектированной информационной сети свойственен синергизм, который возникает на трех этапах. Во-первых, информация — это товар, который не разрушается в процессе использования. Следовательно, при правильном хранении она может быть доступна за минимальную стоимость многим потенциальным потребителям. Во-вторых, информация может быть использована для лучшего понимания гидрологических процессов, в результате чего возрастает информационное содержание существующих и всех будущих данных. В-третьих, синергизм прогрессирует в результате внедрения новых методов и технологий по организации информационных систем, которые могут, подобно составляющим их данным, периодически выступать в качестве товара.

## 19.2 Компьютерная технология

Концепции, технология и применение компьютерной обработки данных описываются в WMO/FAO *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management* [1] (Руководящие указания ВМО/ФАО по компьютерной обработке данных в оперативной гидрологии, земельном и водном хозяйстве).

Компьютерам отводится все более важная роль во всех аспектах сбора и обработки данных. Благодаря современной технологии, первичная обработка данных может быть успешно выполнена в полевой лаборатории на персональном компьютере. Однако возможность накапливать большие объемы данных без визуального контроля может привести к большому количеству ошибок и к искажению записей. В этой связи необходимо проверять качество информации с помощью программ автоматизированного контроля. Хорошо разработанные операционные системы и программное обеспечение для записывающих устройств с соответствующей проверкой в полевых условиях составляют начальный этап первичной системы обработки информации. По возможности, желательно просматривать записи в полевых условиях, так как сопоставление записей с данными близлежащих станций и наблюдение за ходом записи на графическом экране позволяет оценить степень обоснованности собранной информации.

В разделе G *Справочного наставления по ГОМС* [2] имеется ряд разделов, в которых описаны компьютерные системы сбора, обработки и хранения данных.

## 19.3 Персонал и его подготовка

Независимо от опыта руководителя работ по сбору данных, деловые качества его персонала всегда будут оставаться самым ценным ресурсом. Тщательный подбор сотрудников, обучение и контроль за их работой — ключ к созданию и сохранению надежного персонала.

Практические рекомендации по подготовке персонала опубликованы ВМО в *Guidelines for Education and Training of Personnel in Meteorology and Operational Hydrology* [3] (Руководящие указания по образованию и подготовке кадров в области метеорологии и оперативной гидрологии) и ЮНЕСКО в *Curricula and Syllabi in Hydrology* [4] (Учебные планы и программы по гидрологии). Обучение сотрудников, хотя оно дорого и требует много времени, может быть серьезным вкладом, который приводит к наибольшей производительности и эффективности в отношении сбора и обработки данных. Грамотно построенные учебные программы являются важными для всего персонала, занятого сбором данных, поскольку они оказывают влияние на состояние(стандарт) окончательных данных. Основной целью официального обучения должно быть предоставление как общего курса с основными принципами, так и практических навыков для самостоятельной подготовки. Все материалы должны быть общепринятыми и современными. В разделе 2.4 представлена дополнительная информация по вопросам подготовки кадров в области гидрологии.

Если наблюдатели сами не выполняют обработку данных, необходимо, чтобы персонал, занимающийся обработкой, был обучен методам сбора данных для того, чтобы гарантировать обработку данных в соответствии с намерениями наблюдателей. Такая практика позволяет персоналу, занимающемуся обработкой данных, периодически получать практический полевой опыт, чтобы сформировать у него физическое представление в отношении исходных данных. Подобные знания у обработчиков информации позволяют сделать предварительную оценку ошибочных данных до подтверждения их недостоверности от наблюдателя.

Важно установить принцип, что наблюдатель несет основную ответственность за качество данных. Одним из методов соблюдения этого принципа является включение, по возможности, наблюдателя в процесс обработки и обеспечение возврата обработанных данных наблюдателю для оценки. Персонал должен знать, что он несет ответственность за сохранение качества и полноты данных на стадии обработки.

Обработка данных часто носит определенный характер и поэтому хорошо пригодна для применения автоматизации и технических средств. По этой причине важно, чтобы особое внимание было уделено заботе о человеческих ресурсах, а система должна быть построена на поощрении интереса, вовлечении в процесс работы, повышении профессионализма, а также на понимании значимости своей работы. Персоналу, занимающемуся обработкой данных, должна быть предоставлена возможность воплощать идеи, которые могут повысить эффективность системы обработки.

Безопасность персонала также является важным фактором в любой профессии, поэтому требуется внести определенные стандарты безопасности в служебные обязанности наблюдателей и обработчиков информации. Такие стандарты рассмотрены в главе 18. Тем не менее возможность нанесения вреда персоналу при обработке информации часто может быть обусловлена однообразным и повторяющимся характером их работы. Эти проблемы должны привлекать внимание как специалистов по технике безопасности, так и руководства.

### **Список литературы**

1. World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.
2. World Meteorological Organization, 1988: *Hydrological Operational Multipurpose System (HOMS) Reference Manual*. Second edition, Geneva.
3. World Meteorological Organization, 1984: *Guidelines for Education and Training of Personnel in Meteorology and Operational Hydrology*. Third edition, WMO-No. 258, Geneva.
4. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1983: *Curricula and Syllabi in Hydrology* (S. Chandra, L. J. Mostertman, et al.), Technical Papers in Hydrology, No. 22, Paris.



## ГЛАВА 20

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

#### 20.1        **Общая концепция проектирования сети**

Гидрологическая наблюдательная сеть представляет собой группу станций по сбору данных, которые проектируются и действуют для решения либо одной задачи, либо целого ряда взаимосвязанных задач. Это может часто относиться к конкретному использованию данных наблюдений, например, для оценки водных ресурсов, планирования строительства или для проектных расчетов. Та или иная гидрологическая станция или водомерный пост могут входить в несколько сетей, если их информация служит разным целям. В большинстве частей мира это является наиболее распространенной практикой. Но с другой стороны, одна сеть может включать в себя станции и установки разных типов, если каждая из них вносит свой вклад в работу сети. Таким образом и дождемеры, и гидрометрические станции могут входить в сеть по предупреждению паводков.

Термин «сеть» нередко употребляется в нестрогом значении слова. Например, часто можно услышать о сети поверхностных вод, сети подземных вод, дождемерной сети или сети по качеству вод, когда говорящий имеет в виду только комплекты приборов или станции, не увязывая их с целями и задачами. При таком расплывчатом определении термина средства по сбору данных, включенные в сеть, могут даже по-разному использовать получаемую информацию. Это расхождение в использовании является не просто семантическим несоответствием. При обсуждении гидрологами и руководителями программ проблем проектирования сети и анализа ее работы оно может вызвать путаницу и привести к заблуждению.

В идеале проект сети должен был бы основываться на максимальном увеличении экономической значимости той информации, которая будет собрана. Однако на практике бывает иначе. В большинстве случаев при принятии решений по водным ресурсам экономическая значимость гидрологических данных никогда не учитывается. Решения принимаются на основе тех данных, которые имеются, и право отложить принятие решения до получения новых данных обычно не используется. Однако в работах ВМО *Cost-benefit Assessment Techniques and User Requirements for Hydrological Data* [1] (Методы оценки стоимости и потребительские требования к гидрологическим данным) и *Economic and Social Benefits of Meteorological and Hydrological*

*Services* [2](Экономическая и социальная эффективность метеорологических и гидрологических служб) рассматриваются несколько примеров, которые являются исключением из этого общего правила.

Вместо полного экономического анализа проекты сетей обычно основаны на суррогатных мерах экономики или же на руководящих указаниях, которые приводятся ниже в данной главе.

#### 20.1.1 *Определение проекта сети*

Полный проект сети дает ответы на следующие вопросы, относящиеся к сбору гидрологических данных:

- a) какие гидрологические переменные должны наблюдаться;
- b) где их надо наблюдать;
- c) как часто их надо наблюдать;
- d) какова продолжительность программы наблюдений;
- e) с какой точностью должны проводиться наблюдения;

Для ответа на эти вопросы надо представить себе проект сети в виде пирамиды, как показано на рисунке 20.1. Основание пирамиды — научная гидрология. Без полного понимания проектировщиками гидрологической обстановки в районе установления сети — мало шансов, что проектируемая сеть будет эффективно выдавать информацию. Понимание гидрологии приходит как в результате образования, так и в

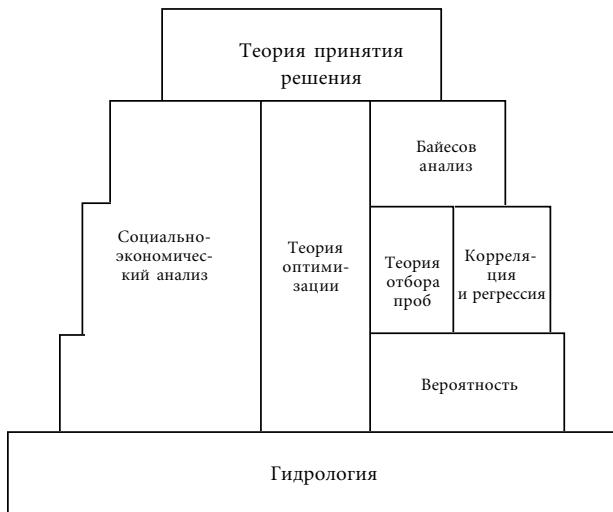


Рисунок 20.1 — Конструкция из основных блоков, учитывающих при проектировании сети

результате обретенного опыта, но ничто не может заменить опыт при создании гидрологической сети в таком районе, где или мало, или совсем нет исторических данных.

Правая сторона пирамиды имеет дело с количественными методами преодоления гидрологической неопределенности. Гидрологическая неопределенность всегда будет иметь место в результате ошибок измерений и ошибок тестирования во времени и пространстве. Совершенной гидрологической информации никогда не бывает. Вероятностное описание этих ошибок является самым эффективным средством при гидрологической неопределенности. В теории вероятности имеются для этого теоремы и язык, и она дает понимание, необходимое для правильного использования данных статистики. На рисунке 20.1 статистические средства представлены теорией проб, а также корреляционным и регрессионным анализом, которые обычно используются при количественном подходе к проектированию сетей. Однако существует много других областей статистики, которые могут быть полезны при анализе и проектировании сетей. Ключевым камнем неопределенности является Байесов анализ, который имеет отношение к уровню неопределенности в описании гидрологических явлений. Иначе говоря, вероятностные описания неопределенности, основанные на статистике гидрологических данных, сами являются неопределенными. Уменьшение неопределенности неопределенностей является ключевым аспектом максимального использования информации, содержащейся в тех данных, которые будет выдавать сеть.

Колонка посреди пирамиды, названная «теория оптимизации», часто включается таксонометрически как часть социально-экономического анализа. Однако, даже при отсутствии социально-экономического анализа, теория оптимизации часто используется при проектировании гидрологической сети. Таким образом, она включена сюда как отдельный компонент структуры. Набор математических программ, каждая со своими достоинствами и недостатками, составляет теорию оптимизации, которую часто называют исследованием операций. В контексте проблемы проектирования сети определяется, какая из математических программ может быть использована в данной ситуации, если вообще какая-то из них может быть использована. Часто, выбор между двумя или более проектами сетей приходится делать умозрительно, поскольку подходящих методов оптимизации или совсем нет, или они настолько громоздки для компьютера, что не могут быть эффективными.

Вершина пирамиды — теория решений, которая является формальным механизмом для интеграции всех основных компонентов. Применение теории решений при проектировании сети не требуется и в большинстве случаев даже невозможно. Однако понимание ложных и истинных предпосылок поможет проектировщику лучше предвидеть последствия принятых им окончательных решений.

Левая сторона пирамиды представляет довольно аморфную группу технологий под заголовком «социально-экономический анализ». Помимо социальных наук и экономики эта часть структуры проекта сети включает науку тактики и даже

политику. Последняя играет очень важную роль в реализации потенциальных возможностей воды и, следовательно, также ценности получаемых на сети данных. Левая сторона — это часть структуры, на которую при проектировании сети обычно обращают меньше всего внимания. Это, по-видимому, можно объяснить двумя причинами: этим анализом трудно заниматься объективно, с помощью математики; для полных исследований требуется синтез данных многих дисциплин, не относящихся к гидрологии и техническим аспектам водных ресурсов. Таким образом, проектирование сети, включающее серьезный социально-экономический анализ, вероятно потребует много денег и времени. Тем не менее, его нужно принимать во внимание, даже если это должно быть сделано субъективно.

### 20.1.2 *Другие подходы*

Поскольку проектирование полномасштабной и совершенной сети в наше время нигде в мире либо невозможно, либо непрактично, при проектировании сетей используются другие подходы с другими мерками, целями и критериями. Так, например, вместо оптимизации экономической ценности данных, обычно прибегают к максимизации содержания информации, получаемой от сети. Исследования показали, что в результате такого решения, если должным образом использовать получаемую информацию, можно ожидать, что она внесет свой вклад в экономическую значимость. Чем больше информации, тем лучше решение. Однако экономическая значимость информации не может линейно соотноситься с ее количеством; маргинальная ценность дополнительной информации уменьшается по мере получения ее определенного количества. Таким образом, использование этого критерия может вести гидрологическую службу в верном направлении лишь в том случае, когда в наличии очень мало гидрологической информации; но если в данном районе уже имеется хорошая информационная база, использование этого подхода может привести к сбору излишних данных.

Среди основных аналитических методов, используемых при таком альтернативном подходе, назовем следующие: картографический анализ; корреляция и методы регрессии; вероятностное моделирование; детерминированное моделирование и методы районирования. Каждый метод имеет особенности применения, и выбор зависит от ограниченности имеющихся данных и типа рассматриваемых проблем. В определенных случаях нередко применяются комбинации различных методов. В публикации BMO *Casebook on Hydrological Network Design Practice* [3] (Справочное пособие по практике проектирования гидрологической сети) излагается применение этих методик в качестве средства для определения требований сети. Другие примеры содержатся в других публикациях BMO [4–6].

### 20.1.3 *Основная сеть*

Ценность данных, получаемых от сети, зависит от того, как они впоследствии будут использованы. Тем не менее, при проектировании сети многие случаи

использования гидрологических данных еще неясны, их трудно предвидеть, и поэтому нет оснований для сбора конкретных данных, которые впоследствии могут оказаться очень ценными. На деле, если бы требовалось заранее готовить экономическое обоснование, очень мало данных было бы собрано. Однако у современного общества выработалось сознание того, что информация является товаром, который как страховку надо покупать для защиты от непредсказуемого будущего. Таким вкладом, применительно к гидрологическим данным, является основная (базовая) сеть, которую устанавливают для обеспечения гидрологической информацией на всякие непредвиденные случаи в будущем для принятия решений по водным ресурсам. Базовая сеть должна обеспечить такой уровень гидрологической информации в любой местности данного региона, который исключал бы грубые ошибки при принятии решений по водным ресурсам. Для достижения этой цели необходимо выполнить, по крайней мере, три условия:

- a) должен существовать механизм передачи гидрологической информации с мест ее сбора на любой другой участок в данном районе;
- b) на любом участке должны также быть средства для определения количества гидрологической информации (или наоборот — неопределенности);
- c) в число решений необходимо включить право на сбор большего количества данных до того, как будет принято окончательное решение.

#### 20.1.3.1 *Минимальная сеть*

На ранних стадиях разработки гидрологической сети первым шагом должно быть установление минимальной сети. Такая сеть должна состоять из минимального числа станций, которое, на основе опыта гидрологических агентств многих стран, признано необходимым для того, чтобы начать планирование экономического освоения водных ресурсов.

Минимальная сеть — это сеть, которая позволит избежать серьезных недостатков в развитии и эксплуатации водных ресурсов на уровне, соответствующем общему уровню экономического развития страны. Такая сеть должна быть создана как можно скорее с включением в нее уже существующих станций. Другими словами, минимальная сеть обеспечивает основу для расширения сети, чтобы она отвечала конкретным целям и нуждам в будущем. Но важно подчеркнуть, что минимальная сеть недостаточна для составления подробных планов развития и не отвечает многочисленным требованиям развитого региона по разработке проектов и освоению водных ресурсов.

#### 20.1.3.2 *Расширение информационной базы*

Как только начинает действовать минимальная сеть, в регионе определяются гидрологические зависимости, интерпретируется информация, создаются модели для определения общих гидрологических характеристик, включая осадки и сток в

любом месте данного района. В районах, где нет водомерных постов, до тех пор пока не будут созданы региональные гидрологические связи, должна действовать основная сеть наблюдательных станций, обеспечивающая необходимый уровень информации. В большинстве случаев результатом этого является увеличение плотности гидрологических станций. Но так бывает не всегда; поскольку модели используются для передачи информации с водомерных постов на те участки, где их нет, то качество модели играет также важную роль в определении плотности основной сети. Если модель очень хорошая, то она из имеющихся данных может извлекать информацию лучше, чем модель низкого качества, и хорошей модели потребуется меньше данных, чем модели более низкого качества, для получения региональной информации заданного уровня. В особой ситуации региональная модель может быть такого хорошего качества, что в основной сети может быть снижен уровень сбора данных.

Так как от станций основной сети зависит очень многое, необходимо, чтобы их записи были высокого качества. Даже если приборы станции адекватны, только правильно сделанные записи будут представлять ценность. Осуществление непрерывных наблюдений в течение длительного времени — особенно за период в 20 лет и свыше — может быть затруднено. Минимальная сеть, в которой станции не обслуживаются или обслуживаются нерегулярно, перестает быть эффективной и не оправдывает своего назначения. Поэтому надо заботиться не только об установлении сети, но и об обеспечении непрерывности ее работы, надежности мониторинга и точности собираемой информации.

При проектировании и введении в строй базовой сети учитываются и экономические, и технические соображения; число наблюдательных станций для работы на неопределенно длительный период времени не должно быть слишком большим. Следовательно, при взятии проб надо принять такую процедуру, которая давала бы максимальный эффект. При этом станции подразделяются на две категории: главные, или базовые станции и вторичные, или вспомогательные станции. Последние работают лишь до тех пор, пока не устанавливаются устойчивые связи (обычно путем корреляции) с одной или более базовыми станциями, после чего их фонды и оборудование могут использоваться для устройства других вторичных станций. Записи на закрытых станциях могут быть восстановлены посредством записей базовой станции и путем связи между станциями. Временами может потребоваться переустройство вторичных станций, если есть основания полагать, что на вторичной, либо связанной с ней базовой станции (станциях), условия изменились.

Непрерывность работы основных станций базовой сети составляет основу для мониторинга долгосрочных тенденций в гидрологических условиях данного региона. Это особенно важно в свете потенциальных изменений гидрологического цикла, которые могут быть вызваны изменениями в землепользовании, а также газами, вызывающими парниковый эффект.

### 20.1.4 *Проект комплексной сети*

Гидрологический цикл непрерывен, и его внутренние связи допускают частичный перенос информации из той части цикла, где она получена, в другую часть цикла. Эффективность такого переноса пропорциональна степени гидрологического понимания, зафиксированной в моделях, которые используются для определения соотношения (и информации) между водой в разных частях цикла. Так, например, запись осадков на водосборе или вблизи водосбора позволяет восстановить запись стока за тот период, когда гидрометрическая установка была неисправна, при условии, что надежная модель осадки—сток была откалибрована за то время, пока водомерные посты исправно работали. Наблюдения за подземными водами могут выполнять такую же роль в случае неисправности водомерного створа, если колодец осуществляет мониторинг зеркала грунтовых вод водоносного слоя, непосредственно связанного со стоком.

В настоящее время еще мало что сделано для того, чтобы эти взаимодействия были должным образом включены в проекты сети. В идеале, взаимодополняемость дождемерных и водомерных пунктов в сети прогнозов паводков могла бы, например, быть использована при проектировании сети для оценки водных ресурсов. Если определить экономическую координацию обеих сетей, их можно было бы оптимизировать вместе, что в результате даст максимум эффективности в выдаче информации. Несмотря на этот технический недостаток, сети следует проектировать многократно, и, в итоге, существующий проект должен стать стартовой точкой для следующих проектов. Этот пример можно расширить. В сети прогноза паводков гидрометрические станции и осадкомерные посты будут, вероятно, находиться в определенных местах, удобных и необходимых для получения информации. Поскольку при оценке водных ресурсов к источникам информации обычно предъявляется меньше особых требований, то весьма вероятно, что многие водомерные пункты сети прогноза паводков могут входить в сеть для оценки водных ресурсов и использоваться как исходные данные при проектировании. Такой императивный подход особенно полезен при проектировании комплексных сетей, таких как базовая, на основе сетей с более ограниченными требованиями к информации. Сюда относятся реперные станции, репрезентативные бассейны и сети для оперативных целей.

#### 20.1.4.1 *Станции для оперативных целей*

Станции могут быть установлены со следующими целями: эксплуатация водоемов, ирригация, навигация, мониторинг качества воды, прогноз паводков, научные исследования. Реперные или станции международного обмена также относятся к этой категории. Длительность эксплуатации специальных станций связана с той целью, для которой они предназначены.

В некоторых случаях особая цель, для которой предназначена станция, может требовать наблюдения только одного аспекта элемента или быть ограничена только

одним временем года. Например, гидрометрическая станция может состоять из максимальной рейки для регистрации только пика максимального паводка или из осадкомера для измерения общего количества осадков за сезон. Хотя такие станции могут выполнять очень важную функцию, они не обеспечивают той информации, которая нужна для общих гидрологических анализов. Следовательно, такие станции могут быть включены, а могут и не быть включены в базовую гидрологическую сеть.

#### 20.1.4.2 *Реперные станции*

Каждая страна и каждый регион большой страны должны иметь одну реперную станцию для обеспечения непрерывной серии последовательных наблюдений и связанных с ними климатологических переменных. Гидрологические реперные станции должны быть установлены в тех районах, которые подвергались в прошлом или могут подвергаться в будущем изменениям, вызванным деятельностью человека. Так как реперные станции — станции длительных наблюдений, им надо уделять должное внимание. Климатологические реперные станции известны как станции международного обмена.

#### 20.1.4.3 *Репрезентативные бассейны*

Репрезентативный бассейн желателен в каждом природном регионе, особенно в тех районах, где ожидается большой экономический рост или имеются особо сложные гидрологические проблемы. В своей простейшей форме они позволяют одновременно изучать осадки и сток, помогая таким образом компенсировать недостатки кратковременных наблюдений и низкую плотность минимальных сетей.

#### 20.1.5 *Проведение анализа сети*

На рисунке 20.2 показано, какие шаги следует предпринять, чтобы провести обзор и обновление проектов уже существующей гидрологической сети. Такие обзоры должны проводиться регулярно, чтобы успешно использовать уменьшение гидрологической неопределенности, обусловленной получением дополнительных данных после последнего анализа сети, и подготовить сеть к социально-экономическим переменам. Ниже приводится описание каждого отдельного этапа анализа.

#### *Установленная структура*

Должна быть указана роль и назначение всех организаций, вовлеченных в различные аспекты деятельности по освоению водных ресурсов (особенно ответственные законодательно). Следует улучшать взаимосвязь между этими организациями, чтобы гарантировать координацию/интеграцию в отношении сетей сбора данных.

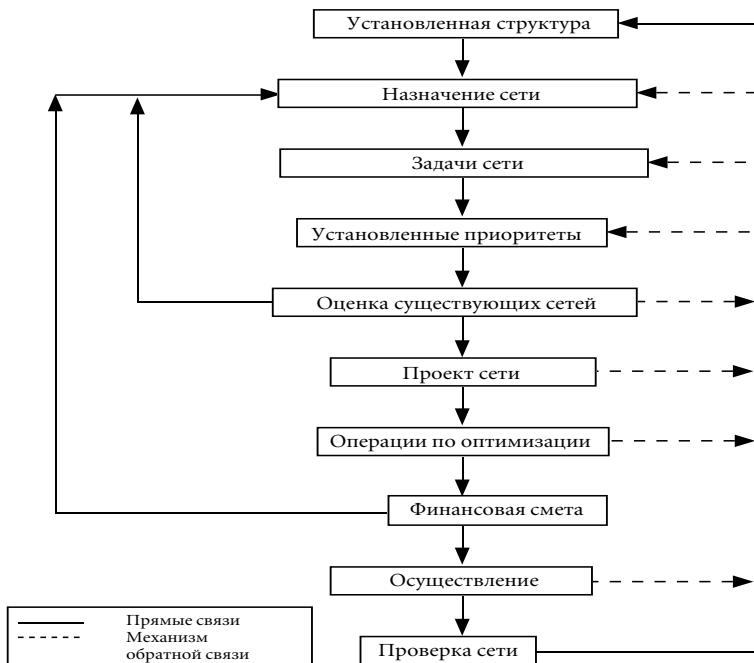


Рисунок 20.2 — Структура для анализа и повторного проектирования сети

### *Назначение сети*

Назначение сети должно определяться через ее потребителей и пользователей. Потребители и пользователи данных могут меняться по времени и территориально. Также необходимо установить будущие потребности, и, кроме того, количество планируемых потенциальных потребителей.

### *Задачи сети*

На основе назначения сети можно установить цель или задачи сети, исходя из требуемой информации. Указание последствий неспособности обеспечить этой информацией может доказать полезность ее в дальнейшем.

### *Установленные приоритеты*

При наличии более одной цели необходимо установить приоритеты для дальнейшей работы. При условии, что все задачи укладываются в бюджет, в этом нет необходимости. Однако, если этого не происходит, задачи более низкого приоритета могут быть удовлетворены неполностью.

### *Оценка существующих сетей*

Информацию о существующих сетях следует собирать и анализировать для того, чтобы определить, насколько существующая сеть соответствует требованиям. Анализ может заключаться в сравнении ее с другими бассейнами и/или сетями.

### *Проект сети*

В зависимости от имеющейся информации и от поставленных целей подбираются самые подходящие методы и технологии для проектирования сети. Это могут быть простые гидрологические характеристики, регрессионные зависимости или анализ сетей, с использованием обобщенного метода наименьших квадратов (НАУГЛС).

### *Операции по оптимизации*

Значительная часть стоимости информации уходит на процедуры по эксплуатации. Сюда входят типы приборов, частота посещения станций, характер полевых выездов. Следует применять процедуры по эксплуатации, требующие минимальных затрат.

### *Определение стоимости*

На основе идентичной сети и процедур по эксплуатации можно установить стоимость эксплуатации сети. Если она не выходит за рамки бюджета, можно перейти к следующему этапу. В противном случае, необходимо либо изыскать дополнительные фонды, либо рассмотреть цели и приоритеты с тем, чтобы определить, где можно сократить затраты. Такой метод должен позволить проектировщику показать, каким образом недостаток фондов мешает выполнению поставленных задач и сокращает количество информации, получаемой от сети.

### *Введение в строй*

Сеть, спроектированная вторично, должна быть введена в строй согласно плану. Это включает как краткосрочное планирование, так и планирование на длительные сроки.

### *Проверка сетей*

Поскольку целый ряд перечисленных выше компонентов с течением времени меняется, необходимо проверять работу каждого отдельного компонента, например: изменение потребителей или потребностей, или изменения в бюджете. Для того чтобы соответственно реагировать на эти изменения, необходимо постоянно проводить проверки.

## **20.2 Плотность станций минимальной сети**

Как сказано в разделе 20.1.3.1, минимальная сеть — это сеть, при наличии которой не будет серьезных недостатков в освоении ресурсов, в соответствии с общим уровнем экономического развития страны и потребностями окружающей среды. Она должна быть установлена как можно скорее и включать в себя все существующие

станции, соответствующие ее профилю. Иначе говоря, такая сеть обеспечит основу для дальнейшего расширения с целью удовлетворения потребностей в информации при использовании водных ресурсов.

Понятие плотности сети должно служить как бы общим ориентиром, при отсутствии специального руководства. В таких случаях запроектированная плотность должна отражать существующие социально-экономические и физико-климатические условия; следует также применять методы компьютерного математического анализа; там, где имеются данные, оптимизировать плотность сети, необходимую для удовлетворения потребностей. Например, анализ сетей с использованием обобщенного метода наименьших квадратов (НАУГЛС), разработанный Геологической службой США [7], предлагает многообещающий подход для оптимизации водомерных постов базовой сети для получения региональной информации.

В следующих разделах предлагаются рекомендации минимальных плотностей гидрологических станций разных типов для различных климатических и географических зон. Эти рекомендации были составлены для данного издания *Руководства* на основе обзора отзывов стран-членов ВМО на Проект оценки опорной гидрологической сети (БНАП)[8]. Достаточно произвольно было выделено ограниченное число крупных зон.

Простейшим и самым точным критерием классификации зон был бы критерий на основе их ранжирования по площади и сезонным колебаниям осадков. Каждая страна могла бы представить надежную карту годовых осадков, и на этой основе могла бы быть создана минимальная сеть. Но это не поможет многим странам, больше всего нуждающимся в сети, поскольку у них имеется очень мало прежних записей данных, и невозможно в связи с этим составление надежной карты осадков. В качестве особой категории надо рассматривать страны, где выпадение осадков распределяется очень неравномерно. Не рекомендуется строить классификацию только на одной этой характеристики.

Плотность населения также имеет значение при проектировании сети. Там, где плотность населения мала, очень сложно установить и эксплуатировать значительное число станций. Например, почти невозможно установить более чем два водомерных поста на площади водосбора в 1 000 км<sup>2</sup>, если население этого района всего 100 человек, особенно если оно непостоянно. Кроме того, в малонаселенных и труднодоступных районах трудно найти наблюдателя. К тому же, эти районы обычно отличаются экстремальными климатическими условиями, например: засушливые или полярные регионы, тропические леса. В таких случаях рекомендуется использовать сумматоры (суммарные осадкомеры), т. к. они не требуют постоянного обслуживания и частого посещения.

Другая крайность — густонаселенные городские районы, где нужна плотная сеть дождемеров для временного и пространственного определения ливней, а также проектирования, управления, контроля ливне-дренажных систем в реальном масштабе времени и других инженерных применений.

На основе вышесказанного, выработаны некоторые общие правила для определения норм плотности. Для минимальных сетей выделено шесть типов физико-географических районов:

- a)* прибрежный;
- b)* горный;
- c)* равнинный, внутри страны;
- d)* холмистый/неровный;
- e)* малые острова (площадью менее 500 км<sup>2</sup>);
- f)* полярные/аридные.

Для района последнего типа необходимо сгруппировать вместе районы, в которых в настоящее время не представляется возможным достигнуть вполне приемлемой плотности из-за их малой населенности, низкого уровня развития коммуникаций и по другим экономическим причинам.

### **20.2.1 Минимальная плотность для климатологических станций**

На климатологической станции базовой сети собирают следующие виды данных: осадки, снегомерная съемка и испарение. Подразумевается, что станции измерения испарения и снегомерной съемки, особенно первая, обычно измеряют температуру, влажность, ветер, потому что эти метеорологические элементы влияют на испарение и снеготаяние.

#### **20.2.1.1 Осадкомерные посты**

Минимальная плотность для осадкомерных постов приводится в таблице 20.1. Эти данные неприменимы для больших пустынь (Сахара, Гоби, Аравийская пустыня и др.) и больших ледяных полей (Антарктика, Гренландия и арктические острова), в которых нет организованной гидрографической сети. В этих районах осадки изучаются с помощью специальных постов и методов наблюдения.

Если следовать определенным принципам установки и использования постов, то небольшое число постов в минимальной сети может отвечать непосредственным нуждам. Вообще, дождемеры должны распределяться равномерно, в соответствии с практической необходимостью получения данных и местонахождением волонтеров-наблюдателей. В горных районах необходимо уделять внимание вертикальной зональности, используя суммарные осадкомеры для измерения осадков на большой высоте над уровнем моря. В дополнение к сети можно использовать снегомерную съемку, но это не должно рассматриваться как часть сети.

Минимальная сеть должна состоять из осадкомерных постов трех типов:

- a)* стандартные осадкомеры: их показания необходимо считывать ежедневно. Кроме того, на каждой стандартной осадкомерной станции следует проводить ежедневные наблюдения, фиксируя слой осадков, снегопад, высоту снежного покрова на земле и состояние погоды;

- b) самопишащие осадкомеры: в развивающихся сетях рекомендуется стремиться иметь, по крайней мере, 10 % таких станций в зонах холодного климата. В районах, подверженных интенсивному кратковременному выпадению осадков, следует добиваться наибольшей плотности записывающих станций. Такие станции будут обеспечивать ценную информацию об интенсивности, распределении и продолжительности осадков.
- В городских районах, где для измерения осадков необходима временная разрешающая способность порядка 1–2 минут, следует обращать особое внимание на временную синхронизацию дождемеров. Для надежных измерений рекомендуются плювиографы с опрокидывающимся сосудом с электронной памятью (или другие компьютерные средства).
- При распределении приоритетов в отношении районов установления записывающих дождемерных устройств первоочередными являются следующие районы: городские районы (население свыше 10 тыс. человек), где, вероятно, будут построены широкие системы дренажа; бассейны рек, где уже действуют или ожидается, что будут действовать системы контроля стока; большие районы, имеющие недостаточную сеть и специальные исследовательские проекты;
- c) суммарные осадкомеры (сумматоры): они могут быть использованы в редко-населенных или отдаленных районах, таких, как пустыни или горные районы. Эти приборы должны считываться ежемесячно, ежесезонно и при любой возможности посещения станции.

Таблица 20.1  
Минимальные плотности, рекомендуемые для осадкомерных станций

<i>Физико-географические районы</i>	<i>Минимальная плотность станций (площадь в км<sup>2</sup> на каждую станцию)</i>	
	<i>Нерегистрирующие</i>	<i>Самопишащие</i>
Прибрежный	900	9 000
Горный	250	2 500
Равнинны (внутри страны)	575	5 750
Холмистый/неровный	575	5 750
Малые острова	25	250
Урбанизированные территории		10–20
Полярные/аридные	10 000	100 000

*Размещение осадкомеров относительно гидрометрических станций* – координация их положения важна для того, чтобы данные осадкомеров могли быть учтены на каждой гидрометрической станции, что необходимо для прогноза паводков. Осадкомеры ставятся либо на гидрометрической станции, либо вблизи нее, и в верхней части водосбора. Осадкомер должен находиться на участке гидрометрической станции только в том случае, если наблюдения являются репрезентативными для всего района. Могут быть случаи их размещения на некотором расстоянии от гидрометрической станции, например, если она находится в узкой, глубокой долине.

### 20.2.1.2 Снегомерная съемка

На всех осадкомерных станциях минимальной сети, там, где это возможно, необходимо вести наблюдения за выпадением снега, за высотой снежного покрова и запасом воды в нем.

Запасы воды в снежном покрове при максимальном накоплении являются показателем общего количества осадков за сезон в тех районах, где зимние оттепели и зимнее таяние не имеют большого значения. В таких районах съемки снежного покрова на выбранных маршрутах могут быть полезны для учета сезонных осадков в местах, недоступных для обычного наблюдения. Такие снегомерные съемки дают полезную информацию также для прогноза речных паводков и их изучения.

Снегомерные съемки проводятся специальными бригадами с помощью простых приборов для взятия проб скопившегося снега, определения высоты снежного покрова и запаса воды в нем (глава 8). Число снегомерных маршрутов, их длина и расположение будут зависеть от топографии водосборов и от тех целей, для которых эти данные собираются. При выборе репрезентативных маршрутов следует учитывать общую высоту над уровнем моря, типы экспозиции и растительного покрова в данной местности. Хорошей плотностью считается один маршрут на  $2\ 000\text{--}3\ 000\text{ км}^2$  для неоднородного района и на  $5\ 000\text{ км}^2$  для однородного района и равнинной местности. Однако эти выводы нельзя считать безоговорочными, каждый случай должен рассматриваться отдельно.

На ранних этапах развития сети снегомерные съемки обычно проводятся раз в год, в то время когда ожидается наибольшее скопление снега. Позднее желательно проводить эти операции чаще и регулярно, через определенные периоды времени, в сезон выпадения снега. Как только становится возможным, наблюдения за снежным покровом должны сопровождаться наблюдениями за связанными с этим метеорологическими факторами, такими, как радиация, температура почвы и скорость ветра.

### 20.2.1.3 Испарительные станции

Испарение может быть определено косвенным путем по водному балансу, энергетическому балансу и аэродинамическим методам и непосредственно, путем измерений с помощью испарителей (глава 9). Испарительная станция состоит из стандартного испарителя отечественного производства, где проводятся ежедневные наблюдения за испарением вместе с наблюдениями за осадками, максимальным и минимальным уровнем воды, температурой воздуха, скоростью ветра, относительной влажностью и температурой точки росы. Нормы испарительных станций минимальной сети, рекомендованные для однородных физико-географических районов, даны в таблице 20.2.

Для долгосрочных исследований водного режима озер и водохранилищ, и контроля водных ресурсов испарение играет важную роль. В таких случаях число и размещение испарительных станций производится в соответствии с площадью и конфигурацией, а также с климатическим районом или районами.

Таблица 20.2

**Минимальная плотность испарительных станций**

<i>Физико-географические районы</i>	<i>Минимальная плотность станций (площадь в км<sup>2</sup> на станцию)</i>
Прибрежный	50 000
Горный	50 000
Равнины (внутри страны)	50 000
Холмистый/неровный	50 000
Малые острова	50 000
Полярные/аридные	100 000

**20.2.2 Минимальная плотность гидрометрических станций****20.2.2.1 Гидрометрические станции**

Главная задача сети гидрометрических станций заключается в получении информации о наличии ресурсов поверхностных вод, их географическом распределении и изменчивости во времени. Величина и частота паводков и засух имеют в этой связи огромное значение.

Минимальная плотность гидрометрических станций приведена в таблице 20.3. Эти нормы неприменимы к большим пустыням (таким как Сахара, Гоби, Аравийская и Кара-Кум), где нет четкой гидрологической сети, а также к большим ледяным полям (Антарктика, Гренландия, арктические о-ва).

Обычно вдоль главного течения больших рек должно быть достаточное количество гидрометрических станций для того, чтобы между станциями была возможна интерполяция расходов воды. Особое положение этих станций определяется топографическими и климатическими условиями. Если разница стока между двумя точками одной реки не превышает допустимую ошибку измерения на станции, тогда дополнительная станция не нужна. В этом контексте также необходимо подчеркнуть, что расход воды небольшого притока нельзя определить с точностью путем вычитания расходов на двух гидрометрических станциях, расположенных выше и ниже устья притока. Там, где сток притока представляет особый интерес, будет нужна отдельная станция. Гидрометрические станции могут чередоваться с водомерными постами (раздел 20.2.2.2).

Таблица 20.3

**Рекомендуемая минимальная плотность гидрометрических станций**

<i>Физико-географические районы</i>	<i>Минимальная плотность станций (площадь в км<sup>2</sup> на станцию)</i>
Прибрежный	2 750
Горный	1 000
Равнины (внутри страны)	1 875
Холмистый/неровный	1 875
Малые острова	300
Полярные/аридные	20 000

Всюду, где возможно, базовые станции должны размещаться на реках с естественным режимом. Там, где это непрактично, следует устанавливать дополнительные станции на каналах или на водохранилищах для получения данных, необходимых для восстановления естественного стока на базовых станциях. Для этой цели могут быть полезными рассчитанные величины стока, проходящие через гидроэлектростанции или затвор плотины, но для этого необходимо обеспечить тарирование контрольных устройств и турбин и периодическую проверку тарирования во время работы гидроэлектростанции.

Станции должны быть расположены в низовьях больших рек страны, непосредственно выше устья реки (обычно вне досягаемости приливов), или в тех местах, где река пересекает границу. Станции должны быть также расположены в тех местах, где реки стекают с гор и выше тех мест, где берут воду для орошения. Другие гидрометрические станции располагаются в следующих пунктах: там, где расход воды изменяется в значительной степени; ниже устья крупных притоков; при вытекании из озер; а также там, где ожидается крупное строительство.

Для обеспечения необходимых измерений на малых реках должно быть, по крайней мере, столько же гидрометрических станций, сколько на главных артериях. Несмотря на то что проведение измерений на малых реках стало необходимостью, непрактично устанавливать на всех гидрометрические станции. На расходы воды малых рек большое влияние оказывают местные факторы. В высокоразвитых регионах, где экономически важны даже самые малые реки, отсутствие сети наблюдений ощущается очень остро даже на водотоках с площадями водосбора всего 10 км<sup>2</sup>.

Для регистрации стока воды в различных геологических и топографических условиях необходимо устанавливать водомерные посты. Поскольку величины стока сильно меняются с высотой местности, базовые станции должны быть расположены так, чтобы они могли более или менее равномерно обслуживать все участки горного района, от подножья горы до более высоких районов. Следует

принимать во внимание также различную экспозицию склонов, что очень важно в гористой местности. Необходимо также уделять особое внимание станциям, которые находятся в озерных районах, где влияние озер можно определить только путем установки дополнительных станций.

#### 20.2.2.2 Уровень воды в реке

Уровень (высота поверхности воды) регистрируется на всех гидрометрических станциях для определения расхода воды. Есть такие места, где требуются дополнительные наблюдения только за уровнем воды, что входит в функцию минимальной сети:

- во всех крупных городах, расположенных вдоль рек, уровень воды используется для прогноза паводков, для водоснабжения и в целях транспорта;
- на крупных реках, в пунктах между гидрометрическими станциями, записи уровня воды могут использоваться для прогноза паводков и регистрации их движения.

#### 20.2.2.3 Уровень воды в озерах и водохранилищах

Уровень воды, температура, штормовой нагон воды, соленость, образование льда и пр. должны быть зарегистрированы на озерных станциях и станциях при водохранилищах. Станции должны устанавливаться на водоемах, площадь водной поверхности которых более 100 км<sup>2</sup>. Так же, как и в случае рек, должна быть получена информация о некоторых более мелких озерах и водохранилищах.

#### 20.2.2.4 Сток наносов и седиментация

Станции предназначены либо для измерения суммарного стока наносов в океан, либо для измерения эрозии, переноса или отложения наносов в пределах страны, бассейна и т. д. При проектировании минимальной сети особое внимание следует уделить эрозии,

Таблица 20.4

**Минимальная плотность, рекомендуемая для станций наблюдений за отложениями**

Физико-географические районы	Минимальная плотность станций (площадь в км <sup>2</sup> на станцию)
Прибрежный	18 300
Горный	6 700
Равнины (внутри страны)	12 500
Холмистый/неровный	12 500
Малые острова	2 000
Полярный/аридный	200 000

переносу и отложениям наносов в пределах страны. Оптимальная сеть содержит станцию измерения наносов в устье каждой важной реки, впадающей в море.

Перенос наносов является важной проблемой для засушливых районов, особенно там, где почвы рыхлые, и для горных районов, где необходимо знать расход наносов для различных инженерных решений.

Несмотря на то что данные о плотности станций, приведенные в таблице 20.4, служат руководством при планировании базовой сети, проектировщик должен быть предупрежден о том, что сбор данных о переносе отложений обходится значительно дороже, чем получение других гидрологических данных. Следовательно, выбор места для таких станций и определение их числа надо производить очень продуманно. Особое внимание следует уделить тем районам, для которых характерна сильная эрозия. Бывает, что на тех станциях, где перенос отложений теряет свою актуальность, целесообразно прекратить наблюдения за количеством отложений.

Данные о переносе отложений могут быть дополнены топографической съемкой отложений, осевших в озерах и водохранилищах. Для этого используется эхолот. Однако информация, полученная таким путем, никак не может заменить измерений переноса отложений на речных станциях.

#### 20.2.2.5 *Станции наблюдений за качеством воды*

Польза водоснабжения в большой степени зависит от химического качества воды. Наблюдения за химическим составом воды для составления настоящего Руководства состоят в периодическом взятии проб воды на гидрометрических станциях и анализе ее основных составляющих.

Число пунктов для взятия проб на реке зависит от гидрологии и от использования воды. Чем выше флуктуация качества воды, тем более часто должны проводиться измерения. Во влажных районах, где концентрация растворенных веществ низкая, требуется меньше наблюдений, чем в сухом климате, где концентрация химических веществ, особенно критических ионов, таких как натрий, могут быть высоки.

Применительно к минимальной сети рекомендуемая плотность станций наблюдений за качеством воды приведена в таблице 20.5. Дополнительное руководство по мониторингу качества воды приводится в разделе 20.4.

#### 20.2.2.6 *Температура воды*

При каждом посещении гидрометрической станции для измерения расхода воды и взятия проб воды необходимо измерять и записывать температуру воды. Время измерения температуры воды также должно быть зафиксировано. На тех станциях, где уровень воды наблюдается ежедневно, наблюдения за температурой такие должны проводиться ежедневно. Эти наблюдения, затраты на которые

ничтожны, могут дать информацию, полезную для изучения водных организмов, загрязнения, образования льда, источников охлаждения воды для промышленности, влияния температуры на перенос отложений, растворимости минеральных ингредиентов.

**Таблица 20.5**  
**Минимальная плотность, рекомендуемая для станций наблюдений**  
**за качеством воды**

Физико-географические районы	Минимальная плотность станций (площадь в км <sup>2</sup> на станцию)
Прибрежный	55 000
Горный	20 000
Внутренние равнины	37 500
Холмистый/неровный	47 500
Малые острова	6 000
Полярный/аридный	200 000

#### 20.2.2.7     Ледяной покров рек и озер

Регулярные наблюдения за ледяным покровом должны включать:

- a) визуальные наблюдения за различными процессами образования и разрушения льда с записью даты первого появления плавучих льдов, даты полного ледостава, даты вскрытия ледяного покрова и даты полного очищения. Эти наблюдения должны проводиться ежедневно;
- b) каждые 5–10 дней в двух или трех пунктах, вблизи выбранных для этого гидрометрических станций, должны одновременно проходить измерения толщины льда. Расположение измерительных пунктов определяется на основании подробных съемок ледяного покрова, проведенных в начале наблюдательного периода.

### 20.3     Наблюдения за подземными водами

Когда цель программы наблюдения за подземными водами состоит в адекватном охвате всей территории, плотность смотровых колодцев в регионе будет зависеть от гидрологических характеристик, от свойств водоносного материала, от влажности и необходимости разработки ресурсов подземных вод. Таким образом, изучение изменений уровня подземных вод должно входить в программу исследования, и сети должны заниматься не только измерением уровня подземных вод, но также и химическими изменениями, эволюцией естественного и искусственного пополнения, мониторингом загрязнения и вторжения соленой воды.

Цели установления наблюдательных скважин заключаются в следующем:

- a) определение глубины зеркала грунтовых вод в больших малоразвитых районах, определение мощности и возраста водоносного горизонта;
- b) определение направления подземного потока;
- c) эволюция составляющих баланса подземных вод;
- d) определение контактов с минерализованными подземными водоемами, в частности контакты морская вода/пресная вода;
- e) предохранение запасов воды от загрязнения и минерализации;
- f) тарирование моделей подземных водных бассейнов;
- g) определение безопасных полевых и эксплуатационных ресурсов;
- h) оценка предлагаемых водных проектов;
- i) прогнозирование уровня воды и ее химического состава по альтернативным проектам организации работ, связанных с водоносным слоем;
- j) руководство эксплуатацией воды и ее искусственным пополнением;
- k) оценка влияния водохозяйственных проектов на окружающую среду.

Наблюдения, измерения и другая деятельность должны планироваться в соответствии с целями и задачами сети. Измерения уровня воды — это один из многих параметров, необходимых для разработки моделей проектирования систем подземных вод.

Поскольку минимальная плотность станций подземных вод еще не разработана, расположение станций и взятие проб основывается на других показателях. Размещение наблюдательных скважин в сети подземных вод зависит от следующих факторов:

- a) размер площади;
- b) гидрологическая сложность района;
- c) задачи сети;
- d) финансовые ограничения.

Если исследуются несколько водоносных слоев, находящихся на разной глубине от поверхности земли и имеющих разные пьезометрические напоры, то для каждого водоносного слоя должна быть установлена отдельная буровая скважина малого диаметра (раздел 16.2). Эти скважины могут находиться на расстоянии всего нескольких метров друг от друга. Положение скважины определяется отдельно для каждого водоносного слоя.

Наблюдательные скважины должны быть расположены согласно общей геометрической модели (в шахматном или треугольном порядке). Однако проект должен быть достаточно гибким, допуская использование уже существующих скважин и обеспечивая доступность измерений.

Базовая или минимальная национальная сеть в слаборазвитых районах должна быть достаточно густой, чтобы обеспечить наблюдения за всеми основными водоносными слоями, которые первоначально определяются на основе имеющейся

геологической информации. Устанавливая первоначальную сеть для слаборазвитых водоносных слоев, следует принимать во внимание следующее:

- a) расстояние между двумя наблюдательными скважинами должно соответствовать расстоянию, на котором можно экстраполировать геологическую конфигурацию водоносного слоя;
- b) это расстояние может меняться от места к месту, но максимальная дистанция между скважинами на очень больших площадях в базовой сети не должна превышать 40 км;
- c) необходимо полностью использовать информацию, получаемую от других скважин, имеющих иное назначение, например разведку нефти;
- d) существующие скважины должны быть включены в сеть для того, чтобы сократить стоимость бурения и установки дополнительных скважин;
- e) на аллювиальных террасах низовьев рек необходимо исследовать гидравлическую связь между подземными водами и колебаниями уровня воды в реке. Следует полностью использовать уже имеющиеся на реке гидрометрические станции, чтобы свести до минимума установку новых долгостоящих станций;
- f) в районах с подземными водоносными слоями, где расстояние от поверхности земли до зеркала грунтовых вод невелико, надо увеличивать плотность базовой сети, располагая скважины по одной на площади от 5 до 20 км<sup>2</sup>. Эта плотность может быть увеличена при интенсивных исследованиях и для управления водоносными горизонтами.

Более интенсивное изучение режима подземных вод и, следовательно, дополнительные данные для этого потребуются в следующих случаях: при интенсивной разработке; интенсивных системах ирrigации или дренажа; особых целях, таких, как изучение вторжения соленой воды или изучение сети подземных вод в связи с крупными инженерными проектами.

#### 20.4 Особые требования к качеству воды

Существует несколько методов мониторинга качества воды. Мониторинг может осуществляться через сеть стратегически расположенных станций с длинным рядом наблюдений, через повторную выборку краткосрочных обследований или, чаще всего, путем сочетания обоих методов. Помимо основных задач программы, при расположении станций следует учитывать следующие факторы:

- a) существующие условия и проблемы, связанные с водными ресурсами;
- b) потенциальный рост центров (индустриальных и муниципальных);
- c) тенденции в изменении населения;
- d) климат, географию, геологию;
- e) доступность;
- f) наличие рабочей силы, фонды, средства для обработки полевых и лабораторных данных;
- g) межведомственные соображения;

- h) время на дорогу до лаборатории (для скоропортящихся проб);
- i) безопасность персонала.

Проект программы взятия проб следует опробовать и оценить на его начальной стадии для обеспечения эффективности и продуктивности выполнения поставленных целей.

**Таблица 20.6**  
**Основные переменные ГСМОС/Воды**

	<i>Реки</i>	<i>Озера и водохранилища</i>	<i>Подземные воды</i>
<i>Общее качество воды:</i>			
Расход воды/уровень	X	X	X
Сумма взвешенных частиц	X	-	-
Температура	X	X	X
pH	X	X	X
Электропроводность	X	X	X
Растворенный кислород	X	X	X
Прозрачность	-	X	-
<i>Растворенные соли:</i>			
Кальций	X	X	X
Магний	X	X	X
Сода	X	X	X
Калий	X	X	X
Хлорид	X	X	X
Фтористые соединения	-	-	X
Сульфат	X	X	X
Щелочность	X	X	X
<i>Питательные вещества:</i>			
Нитраты и нитриты	X	X	X
Аммиак	X	X	X
Общее количество растворенного фосфора	X	X	-
Общее количество макрочастиц фосфора	X	X	X
Общее количество неотфильтрованного фосфора	X	X	-
Реактив диоксида кремния	X	X	-
<i>Органические вещества:</i>			
Хлорофилл а	X	X	-

#### 20.4.1 *Параметры качества воды*

Параметры, характеризующие качество воды, могут иметь несколько классификаций. Они могут классифицироваться: по физическим свойствам (таким, как температура, электропроводность, цвет, мутность); по неорганическим химическим компонентам (например: растворенный кислород, хлориды, щелочность, фтористые соединения, фосфорные компоненты, металлы); по органическим химикатам (таким, как фенолы, хлорированные углеводороды, полициклические ароматические углеводороды и пестициды) и по биологическим компонентам как по микробиологическим, таким, как фекальные калиформы, так и по макробиотическим, таким, как черви, планктон и рыба, которые могут служить показателями экологического здоровья водной среды.

Вторая классификация строится на основе важности определяемых параметров. Это зависит от типа водоема, от намечаемого использования воды и от целей программы мониторинга. Переменные, определяющие качество воды, иногда группируют по двум категориям:

- a) основные переменные (таблица 20.6);
- b) переменные, связанные с использованием:
  - i) питьевое водоснабжение;
  - ii) орошение;
  - iii) общее количество жизни в водной среде.

Третья классификация, в большей мере относящаяся к взятию проб в соответствии с показателями стабильности:

- a) консервативные (материал не меняется во времени);
- b) неконсервативные (изменяется во времени, но при соответствующей обработке может сохраняться, по крайней мере, в течение 24 часов);
- c) неконсервативные (материал быстро изменяется во времени и не может быть стабилизирован).

Первые две группы могут быть измерены путем последующего лабораторного анализа репрезентативных проб воды. Третья группа должна быть измерена тотчас же на месте.

#### 20.4.2 *Качество поверхностных вод*

Иногда задачи программы точно определяют оптимальное место для отбора проб в речной или озерной системе. Например, для того чтобы определить влияние притока на реку, в которую он впадает, пункты отбора проб понадобится располагать выше и ниже места впадения притока в реку. В других случаях место и

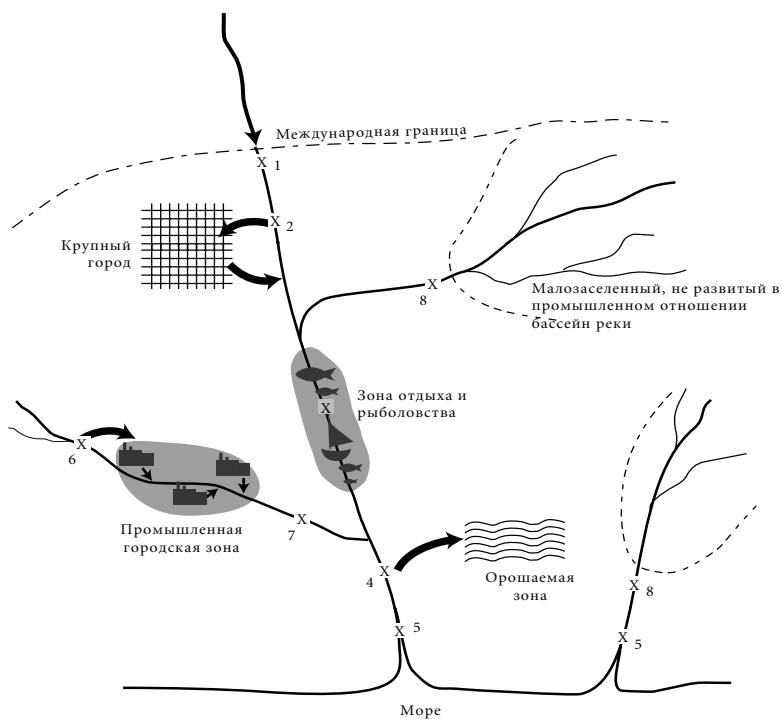
частота взятия проб будут определяться законами загрязнения водоемов или требованиями определенного использования водных объектов, например, допуск на расход поверхностных вод может определить детали мониторинга, такие, как места отбора проб, количество проб, частота проведения анализов и параметры, необходимые для анализа.

Стратегия взятия проб различна для разных видов среды и водных объектов, например: для воды, наносов или биоты. Загрязнение воды в реке может произойти на расстоянии от нескольких до нескольких сот километров от источника загрязнения. Озера могут иметь вертикальную стратификацию по температуре или в результате притока соленой воды большей плотности. Подземные воды отличаются очень медленным водообменом, и на поверхности не видно тех перемен в растворенных веществах, которые происходят внизу.

Если цели исследования касаются влияния деятельности человека на качество воды в бассейне данной реки, бассейн может быть разделен на две части — естественную и подвергшуюся влиянию. Последняя может быть впоследствии подразделена на стационарные зоны (скажем, на периоды свыше 10 лет) и зоны, влияние на которые меняется, такие, как сельскохозяйственные, зоны проживания людей и промышленные зоны. В изучении кислотных отложений важным фактором является чувствительность земной поверхности к отложениям. Рисунки 20.3 и 20.4 дают примеры того, как располагать пробоотборные станции в озерных и речных системах, чтобы они максимально отвечали своему назначению.

Следующим шагом в выборе места отбора проб будет сбор соответствующей информации о районе проведения мониторинга. Искомая информация включает: геологические, гидрологические и демографические аспекты, а также число озер и рек, размеры и местоположение водоносных слоев, положение существующих гидрометрических станций и пунктов определения качества воды, скорость течения, климатические условия в районе водосбора, историю развития, настоящие и потенциальные муниципальные и промышленные центры, существующие водозаборы и сбросы, естественные соленые источники, дренажные скважины, планы ирrigации, регулирование стока (дамбы), существующее и планируемое использование воды, стандарты или нормы качества речной и озерной воды, доступность потенциальных участков отбора проб (важно, кому принадлежит земля, дороги, взлетные площадки), наличие электричества, наличие данных о качестве воды. На рисунке 20.5 показано, какие шаги надо предпринять для выбора участков пробоотбора.

Расстояние вниз по реке, до места полного перемешивания воды примерно пропорционально скорости течения и квадрату ширины русла реки. Глубина рек обычно настолько невелика, что ниже источника загрязнения можно быстро получить вертикальную однородность. Перемешивание воды по ширине обычно достигается гораздо медленнее. Таким образом бывает, что на широких реках с

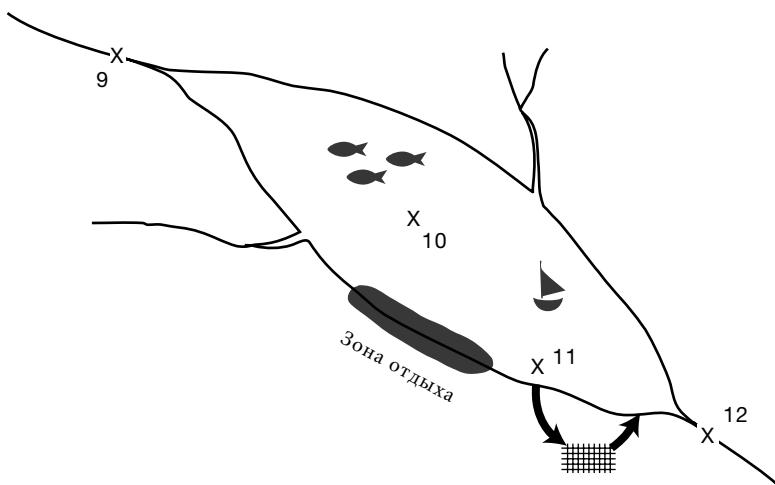


<i>Станция</i>	<i>Критерии</i>
1	Непосредственно ниже по течению от международной границы
2	Водозабор для снабжения большого города
3	Важная зона для рыболовства, отдыха и развлечений
4	Крупный водозабор для сельскохозяйственной ирригации
5	Приливная граница пресной воды по главной реке
6	Водозабор для снабжения крупной индустрии
7	Ниже сброса промышленных стоков и важного притока, влияющего на главную реку
8	Базовая сетевая станция, вода в естественном состоянии

Рисунок 20.3 — Участок мониторинга рек

быстрым течением на протяжении многих километров от точки поступления загрязнения и вниз по течению реки, полного перемешивания так и не происходит.

Для определения репрезентативности проб в водном сечении реки рекомендуются различные методы, например, шесть проб анализируются в двух экземплярах — в трех местах по ширине реки и на двух глубинах — или пробы берутся на



<i>Станция</i>	<i>Критерии</i>
9	Основной питающий приток
10	Общее качество воды в озере
11	Водоснабжение
12	Вода, вытекающая из озера

Рисунок 20.4 — Участок мониторинга озер

средней глубине через каждую четверть ширины реки, или на других, равных друг от друга расстояниях по ширине реки. Если же нельзя получить представительные пробы, рекомендуется выбрать другой участок, рядом с этим или ниже по течению. Другая альтернатива состоит в получении средневзвешанной пробы, составленной из проб, взятых на вертикалях водного сечения реки.

Продольное перемешивание нерегулярных или циклических сбросов в реку будет иметь второстепенное влияние на положение мест взятия проб. Это влияние должно быть учтено при определении частоты взятия проб и интерпретации полученных данных.

Частота отбора проб зависит от назначения сети, от значения станций для взятия проб, от диапазона измеряемых величин и изменчивости во времени интересующих параметров, а также от наличия ресурсов. При отсутствии достаточной исходной информации, частота взятия проб принимается произвольно на основе знания местных условий. После того как будет собрано достаточно данных, принимается та частота,

которая будет отражать наблюдаемую изменчивость. На частоту наблюдений влияет относительное значение станции, а также то обстоятельство, насколько приближаются к критическому уровню концентрации некоторых измеренных веществ.

Для озерных станций рекомендуются следующие процедуры: отбор проб в течение 5 дней подряд в самое теплое время года и в течение 5 дней подряд каждые 3 месяца. Особый случай представляют озера умеренной зоны, которые подвержены стратификации. В них берут пробы, по крайней мере 6 раз в год, вместе с дополнительной произвольной пробой в течение следующих периодов: во время открытой воды (без ледяного покрова), перед летней стратификацией, после летней стратификации в период перемешивания подо льдом и в период снеготаяния и дождевых паводков. Подобным образом, если возможно, следует брать дополнительные пробы в реках после штормов, во время половодья и дождевых паводков.

Если построить графическую связь параметров во времени, то среди произвольных колебаний можно заметить циклические вариации. Для того чтобы обнаружить циклические явления, необходимо, чтобы интервал между взятием проб был не больше одной трети времени самого короткого цикла, и отбирать пробы следует в течение периода, который был бы по крайней мере в 10 раз больше, чем время самого длинного цикла. Поэтому при начальном обследовании долгосрочные циклы не получают подтверждения, но они станут заметны во время работы сети. Для обнаружения циклических вариаций желательно брать пробы произвольно, т. е. в разные дни недели и в разное время суток.

#### 20.4.3 *Качество осадков*

Обычно участки для взятия проб надо подбирать так, чтобы они давали точную и репрезентативную информацию о временных и пространственных изменениях химических элементов, представляющих интерес. Необходимо принимать во внимание следующие важные факторы: преобладающие направления ветра, источники соединений, представляющих интерес, частоту выпадения осадков (дождя, снега, града) и другие метеорологические процессы, влияющие на осадки. Следует также учитывать и местные условия:

- a) в пределах 1 000 м от участка взятия проб не должно быть никаких движущихся источников загрязнения, например: застоявшегося воздуха, наземного или водного транспорта;
- b) в пределах 1 000 м от участка взятия проб не должно быть наземных складов сельскохозяйственных продуктов, жидкого топлива или каких-либо других инородных материалов;
- c) пробоотборники должны быть установлены на плоской поверхности земли с не нарушенным почвенным покровом, предпочтительнее с травяным, окруженным

деревьями, на расстоянии не менее 5 м от пробоотборника. Поблизости не должно быть разносимых ветром источников загрязнения таких, как обработанные поля или немощеные дороги. Особенно следует избегать зон сильной турбулентности, т. е. зон сильных вертикальных турбулентных потоков, водоворотов с подветренной стороны гор, обдуваемых ветром горных вершин или крыш зданий;

- d) в пределах 5 м от участка не должно быть объектов более высоких, чем пробоотборник;
- e) если поблизости имеется объект более высокий, чем пробоотборник, то расстояние, на котором он может находиться, должно быть не меньше чем разница в их высоте, умноженная на 2,5. Особое внимание необходимо уделять высотным проводам;
- f) коллектор пробоотборника должен быть расположен на высоте не менее 1 м от земляного покрова, чтобы в него попадало как можно меньше песка, пыли или брызг;
- g) для автоматических пробоотборников, для их крышек и датчиков, а в ряде случаев и для летнего охлаждения и зимнего таяния требуется электроэнергия. Если используются электролинии, провода не должны быть над головой; если используются генераторы, то их выхлопные трубы должны находиться далеко и с подветренной стороны от коллектора;
- h) рассматривая проблему в масштабе континента, надо сказать, что предпочтительно, чтобы участки отбора проб находились в удаленной сельской местности, вдали от источников загрязнения, не менее чем в 50 км с наветренной стороны и в 30 км в других направлениях.

Возможно не всегда все эти условия могут быть выполнены. При описании станции следует учитывать эти рекомендации и указывать точные характеристики каждого участка, выбранного для отбора проб.

В случае крупных озер, осадки над озером могут быть не такими сильными, как у берега, и доля крупных частиц в них может быть меньше. Для пробоотбора в середине озера надо установить пробоотборник на буе, на скале, на отмели или на небольшом острове.

Отбор проб во время дождя, снега или града является наиболее предпочтительным методом пробоотбора осадков. Анализ проб, взятых во время выпадения осадков, позволяет определить загрязняющие вещества, связанные со штормом, ливневым дождем или снегопадом, а анализ траектории ветра поможет определить вероятные источники загрязнения. Однако этот режим пробоотбора отличается большой чувствительностью. Частота пробоотбора осадков такая же, как при отборе проб поверхностных вод, статистический учет тоже такой же.

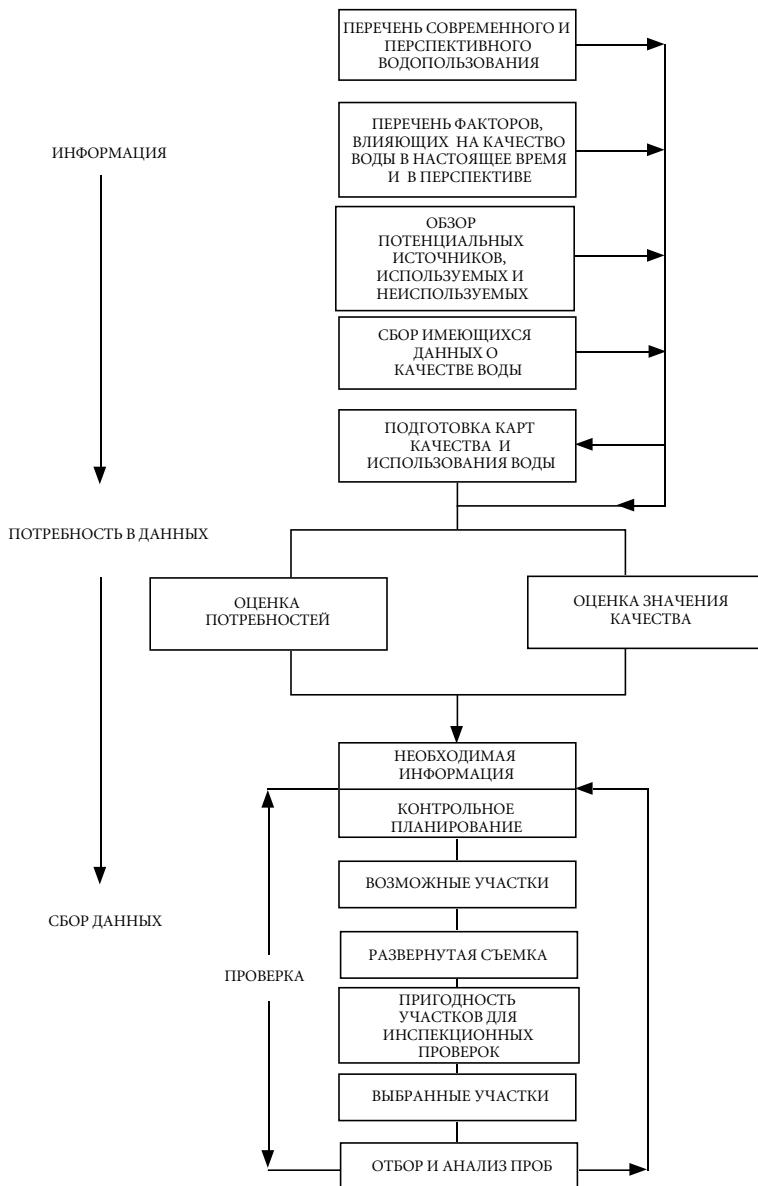


Рисунок 20.5 — Схема для выбора участков отбора проб на качество воды

#### 20.4.4 *Качество отложений*

Большинство изложенных в предыдущих разделах критериев отбора проб применимо и к отбору проб отложений. Поэтому здесь будут описаны только некоторые дополнительные рекомендации.

Там, где требуются данные о переносе отложений в реке, участки отбора проб необходимо располагать вблизи водомерных постов с тем, чтобы точная информация о расходе воды в реке могла быть получена в любое время. Следует избегать размещения пробоотборников вверх по течению, поблизости от слияния рек, ибо тогда они могут подвергаться влиянию подпора и застоя воды. В реках, слишком глубоких для перехода вброд, участки отбора проб следует располагать под мостом или под гидрометрической люлькой. Если пробы берутся с моста, то ее обычно берут на той стороне моста, которая выше по течению. Пробоотбор в районе высокой турбулентности, например вблизи волнолома, часто бывает нерепрезентативным. Надо также обращать внимание на скопление твердых наносов и мусора у волноломов, ибо это может сильно отклонять течение и, следовательно, распределение наносов. Составные пробы, полученные в результате смешивания воды из разных точек отбора по водотоку, могут считаться репрезентативными по среднему расходу наносов, если вода хорошо перемешана.

Для взятия проб донных отложений в реках с быстрым течением лучшими местами считаются те, где скорость течения минимальна, т. е. на барах в середине реки, при повороте или изгибе русла, на отмели или в других защищенных местах.

Участки отбора проб должны быть доступны во время паводков, ибо в это время скорость переноса отложений бывает наибольшей.

Для рек, при определении пика стока загрязняющих наносов, надо рассматривать два случая:

- a) для загрязнения, идущего из точечного источника, пробоотбор следует проводить во время меженного стока, когда приток загрязнений меньше разбавлен;
- b) когда загрязнение идет из рассеянных источников, например от стоков с сельскохозяйственных земель, обработанных удобрениями или пестицидами, тогда пробоотбор следует проводить во время паводков, когда загрязняющие вещества вымываются из почвы.

Если одной из целей является определение количества переносимых отложений в речной системе, то следует иметь в виду, что пик концентрации отложений неизбежно соответствует времени пика расходов воды. Кроме того, высокие расходы воды приведут к прогрессивно падающим пикам отложений — эффект истощения, происходящий от уменьшения количества материала, способного подвернуться супензии.

Для озер базовый пробоотборный участок должен быть расположен в географическом центре озера. Если озеро очень большое (площадь  $> 500 \text{ км}^2$ ), то в таком случае может понадобиться несколько базовых станций. Если нужен отбор проб наносов разных типов, то можно использовать данные акустического обследования (эхолот) как для определения типов поверхностного материала (песок, гравий, глина), так и для определения наличия подповерхностного расслоения.

Вспомогательные участки отбора проб следует размещать между базовой станцией и устьем главного притока, или между базовой станцией и источниками загрязнения. Пункты отбора обычно размещают вдоль длинной оси озера и на пересекающихся местами поперечниках. Для приблизительного определения качества наносов в озере среднего размера бывает обычно достаточно 3–5 станций. Но для статистической достоверности, видимо, потребуется большее число участков отбора проб.

На частоту пробоотбора в озерах влияет, как правило, низкая концентрация взвешенных наносов. Во время максимума и минимума продуктивности водорослей и во время большого поступления речных наносов, следует использовать ловушки наносов.

При повторном пробоотборе донных отложений необходимо учитывать скорости накопления наносов. В зоне умеренно-прохладного климата скорость накопления наносов часто не превышает 0,1–0,2 мм в год, и если нет какого-то нового источника загрязнения и не поступает сколько-нибудь заметной новой информации, то достаточно проводить повторный отбор проб раз в 5 лет.

#### 20.4.5 *Качество подземных вод*

Для планирования отбора проб из водоносного слоя требуется большое количество гидрологической информации. Надо знать уровни воды, гидравлические градиенты, скорость и направление движения воды. Следует сделать схему колодцев, буровых скважин и родников, питаемых водоносным слоем, и учесть детали землепользования.

Пробы подземных вод берутся из дренированных вод, открытых колодцев и буровых скважин. Пробоотбор из колодца следует производить только после достаточно длительной откачки воды, чтобы обеспечить забор свежей пробы. Это особенно важно в тех случаях, когда стенки колодца подвержены коррозии.

Уже имеющийся действующий колодец обходится дешево, хотя такие колодцы не всегда удобно расположены и не всегда сделаны из незагрязняющих материалов. Колодец, которым пользуются и из которого регулярно откачивают воду, предпочтительнее заброшенного колодца. Заброшенные колодцы, которыми не пользуются, часто находятся в плачевном состоянии, с поврежденными или протекающими стенками и проржавленным насосным оборудованием. В них часто бывает трудно измерить уровень воды, и они небезопасны.

Изменения, происходящие в подземных водах, могут быть очень медленными и могут быть правильно описаны на основании ежемесячных, сезонных и даже ежегодных пробозаборов.

### Список литературы

1. World Meteorological Organization, 1990: *Cost-benefit Assessment Techniques and User Requirements for Hydrological Data*. Operational Hydrology Report No. 32, WMO-No. 717, Geneva.
2. World Meteorological Organization, 1990: Economic and social benefits of meteorological and hydrological services. *Proceedings of the Technical Conference*, 26-30 March 1990, Geneva, WMO-No. 733, Geneva.
3. World Meteorological Organization, 1972: *Casebook on Hydrological Network Design Practice*. WMO-No. 324, Geneva.
4. World Meteorological Organization, 1969: *Hydrological Network Design: Needs, Problems, and Approaches* (J. C. Rodda, et al.). WMO/IHD Projects Report No. 12, Geneva.
5. World Meteorological Organization, 1976: Hydrological network design and information transfer. *Proceedings of the International Seminar*, 19-23 August 1974, Newcastle-upon-Tyne, U.K., Operational Hydrology Report No. 8, WMO-No. 433, Geneva.
6. World Meteorological Organization, 1982: *Concepts and Techniques in Hydrological Network Design* (H. E. Moss). Operational Hydrology Report No. 19, WMO-No. 580, Geneva.
7. Moss, M. E. and Tasker, G. D., 1991: An intercomparison of hydrological network design technologies. *Hydrological Science Journal*, Vol. 36, No. 3, pp. 209-221.
8. World Meteorological Organization, 1992: *Proceedings of the International Workshop on Network Design Practices*. 11-15 November 1991, Koblenz, Germany, (in preparation).

## ГЛАВА 21

### СБОР ДАННЫХ

#### 21.1        **Выбор участка**

По окончании первой фазы проектирования сети определяется общее местоположение участков по сбору данных, а также типы приборов, после чего в пределах намеченного участка выбирается самое удобное место, которое лучше всего отвечало бы требованиям, перечисленным в части В настоящего Руководства. Для обеспечения необходимого качества данных могут понадобиться изменения в выбранном участке, например очистка его и укрепление контрольного створа.

Когда место выбрано и приборы установлены, проводится сбор двух типов данных — подробное описание самого участка и его расположения и гидрологические наблюдения, выбранные для измерения.

После установки оборудование вводится в действие и функционирует согласно существующим стандартам. Обычно это включает выполнение необходимых плановых проверок и обслуживания, которое обеспечило бы непрерывность и надежность получения информации и проведение обычных контрольных измерений и тарирования для обеспечения требуемой точности данных.

#### 21.2        **Идентификация станции**

Для обеспечения подробной исторической документации по сбору данных на станции необходимо учитывать два аспекта — организацию системы идентификации и архивацию описательных данных.

##### 21.2.1        **Идентификация участков сбора данных**

Каждый постоянный участок по сбору данных должен получить единый код, который будет использоваться для обозначения всех данных, а также другой информации, относящейся к данному участку. Такие коды обычно имеют цифровой вид, но могут быть и буквенно-цифровыми.

Часто в одной стране или в регионе станциями по сбору данных руководят несколько служб или учреждений, поэтому принятая всеми заинтересованными сторонами единая, уникальная система идентификации, облегчит обмен информацией,

а также координацию деятельности по сбору данных. Выбор региона должен определяться водосборными бассейнами или климатическими зонами, и часть кода участка должна отражать его местоположение в регионе.

Код участка может просто иметь специальный номер, т. е. номер, который дается станции при ее учреждении. Идентификация участка в Канадском национальном банке данных о качестве воды (NAQUADAT) представляет собой сложную систему, предназначенную для компьютерной обработки. Она имеет 12-значный буквенно-цифровой код, который является ключевым элементом в хранении и выдаче данных в компьютерной системе. Этот номер состоит из нескольких подразделов [1]:

- a) тип воды: двузначный цифровой код, показывающий, откуда взята вода для пробы, например: из ручья, реки, озера или осадков. Эти значения кода могут быть дополнены другими видами водной среды; перечень всех текущих кодов приводится в таблице 21.1;
- b) провинция, бассейн и бассейн притока: три пары букв и цифр, идентифицирующих провинцию, бассейн и бассейн притока;
- c) порядковый номер: четырехзначное число, которое обычнодается региональным офисом.

Таблица 21.1  
Коды NAQUADAT для всех типов водной среды

<i>Тип</i>	<i>Код</i>	<i>Подтип</i>	<i>Код</i>
Поверхностные воды	0	Речное русло	0
		Озеро	1
		Эстуарий	2
		Океан—море	3
		Пруд	4
		Заполненное водохранилище	5
		Залив	6
		Канава	7
		Сток	8
		Неизвестный	9
Подземные воды	1	Колодец-отстойник	0
		Источник	1
		Пьезометрический колодец	2
		Дренаж керамическими трубами	3
		Болото	4
		Водопроводная вода	8
		Неизвестный	9

Таблица 21.1 (*продолжение*)

Сточные воды очищенные и неочищенные	2	Промышленные Муниципальные Горнорудные Сток от животноводства Неизвестные	0 1 2 3 9
Осадки	3	Дождь Снег Град Смешанные осадки Выпадение сухих осадков	0 1 2 3 4
Обработанные запасы воды	4	Муниципальные Промышленные Горнорудные Частные (индивидуальные) Другие коммунальные работы Муниципальное распределение Муниципальная обработка для промышленности Остатки после обработки Прочие	0 1 2 3 4 5 6 7 9
Наносы, почвы	5	Речное русло Дно озера Берег реки Берег озера Почвенные загрязнения Обычная почва Почва, намытая при ирригации Почва из остатков обработки Прочие	0 1 2 3 4 5 6 7 8
Промышленные стоки	6	Ливневые стоки Первичный водозабор Первичный сброс Конечный сброс Остатки обработки Особые проблемы Прочие	0 1 2 3 4 5 6
Муниципальные стоки	7	Необработанные Сток первичного отстоя Сток вторичного отстоя	0 1 2

Таблица 21.1 (*продолжение*)

Муниципальные стоки ( <i>продолжение</i> )	7	Обычные первичные сбросы	3
		Обычные вторичные сбросы	4
		Сбор обработанной воды	5
		Дезинфицированные сбросы	6
Различные сточные воды	8	Необработанные осадки	7
		Канализационные стоки	8
		Прочие	9
		Неочищенная вода	0
		Первичного отстоя стоки	1
		Вторичного отстоя стоки	2
		Обычные первичные сбросы	3
		Обычные вторичные сбросы	4
		Сброс отработанной воды	5
		Дезинфицированные сбросы	6
Водная биота	9	Необработанные стоки	7
		Канализационные стоки	8
		Прочие	9
		Будет разделена на категории позднее (например: рыба, фитопланктон, бентос, макрофиты, перифитон, зоопланктон)	

Источник: World Meteorological Organization, 1988: *Manual on Water Quality Monitoring — Planning and Implementation of Sampling and Field Testing. Operational Hydrology Report No. 27, WMO-No. 680*, Geneva.

Например, номер станции 00BC08NA0001 означает, что участок отбора проб находится на реке, в провинции Британская Колумбия, в бассейне 08, в бассейне притока NA и имеет порядковый номер 1. Станция 010N021E0009 находится на озере, в провинции Онтарио, в бассейне номер 02, в бассейне притока 1E и ее порядковый номер — 9.

В ВМО приняли кодовую систему идентификации станций [2], которая подобна *b*) и *c*) системы NAQUADAT.

Другая хорошо известная кодовая система для пунктов отбора проб — это индекс по месту на реке (в милях), используемая Агентством США по защите окружающей среды как часть системы STORET. В этой системе местоположение пункта отбора проб определяется его расстоянием от устья реки и его гидрологической связью с устьем речной системы. Она включает коды больших и малых бассейнов, номера пограничных рек, направление течения и уровень водотоков, расстояние в милях до слияния рек, а также код идентификации того уровня реки, где расположен пункт отбора проб.

### 21.2.2 *Описательная информация*

Во многих случаях ценность информации возрастает, если потребитель может соотнести ее с историческими подробностями ее сбора. С этой целью регистрационные архивы станций должны содержать подробности работы каждой станции. Степень детализации будет, конечно, изменяться в зависимости от используемых параметров, но типичная информация обычно включает: название станции и детали по ее расположению; тип станции; связанные с ней станции, их организацию, эксплуатацию, их владельца и руководство; высоту над уровнем моря; частоту наблюдений; период ее работы; точное описание установленного оборудования. Следует включить также дополнительную информацию, характерную для данной станции. Отобранныя информация из этого текстового файла должна регулярно приобщаться к выходным данным (глава 25).

Исторические данные с более подробной информацией должны быть готовы для выдачи их в случае необходимости (глава 25). И опять же степень подробности будет зависеть от типа наблюдений. Речная станция может включать такие детали как: климатическая зона, осадки и данные об испарении, геоморфологию, форму рельефа, растительность, использование земли, расчищенные участки для обработки почвы, детали по самой станции. Типичные компоненты такого архива будут включать: описание станции, подробную схему участка, карту расположения участка в регионе, подробное описание участка и региона. Примеры формата таких архивных документов можно найти в [3] и [4]. На рисунке 21.1 приведен пример одного такого формата.

#### 21.2.2.1 *Описание станции*

Точное описание станции включает указание расстояний до всех важных пунктов. Очень важно, чтобы все эти пункты были постоянными и четко идентифицированными. Например: «5 м на северо-запад от молодого ивняка» — недостаточное описание участка наблюдений. Пример правильного описания — следующий: «30 м вниз по течению от моста Леди Абердин (автострада 148), между Холлом и Мысом Гатиню и в 15 м от пирса, на левой стороне, вниз по течению». Также должны быть указаны даты учреждения станции и начала сбора информации.

Для станций, измеряющих речной сток и параметры качества воды, информация о местоположении должна включать описание водотока выше и ниже станции. В нее входит глубина воды, описание берегов по обе стороны водотока и материалов, слагающих дно русла. В описании водного объекта должны быть указаны все особенности морфологии, которые могут повлиять на режим стока воды или на ее качество. Такие особенности могут включать изгибы реки, расширение или сужение русла, наличие островов, порогов или водопада, впадение притока вблизи станции. При описании берегов следует описать характер склона, материал берега, степень покрытия растительностью. Материал, слагающий русло, или отложения,

ДОЕ, ДИРЕКТОРАТ ВНУТРЕННИХ ВОД, ОТДЕЛ КАЧЕСТВА ВОДЫ

## ОПИСАНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТАНЦИИ

РЕГИОН КьюбекПРОВИНЦИЯ КьюбекБАССЕЙН река Оттава

## ДАННЫЕ СТАНЦИИ

Тип ПРОВ. БАСС. ПОД-  
БАСС. следующий

00	QU	02	LH	00	3	6	000
----	----	----	----	----	---	---	-----

ШИРОТА				ДОЛГОТА				PR
S	DEG	MIN	SEC	S	DEG	MIN	S	EC
	4	5	27		0	75	42	05
UTM	Восточная			СЕВЕРНАЯ			PR	
Зона		S	0		S			

РАСПОЛО-  
ЖЕНИЕ  
СТАНЦИИНа Gatineau

Lady Aberdeen

В bridge рядом Pte. Gatineau Пров. Que.

Расположена \_\_\_\_\_ Sec. \_\_\_\_\_ Район \_\_\_\_\_

Основана April 1978Расстояние от базы до станции 3.5 kmРасстояние от станции до исслед. участка 17 km

Расположение станции по отношению к городам, мостам, дорогам, притокам, оставам, плотинам и т.д.:

30 m downstream of Lady Aberdeen bridge (Highway 148)  
between Hull and Pointe Gatineau and 15 m off pier on  
left side (looking downstream)

Расположение и описание соседних гидрометрических установок:

Baskatong dam about 190 km upstreamFarmers rapids about 25 km upstream

Рисунок 21.1 — Формы для описания местонахождения станции.

ОПИСАНИЕ  
СТАНЦИИ

Направление стока:

Юго-Восток

Описание русла выше станции:

Permanent log boom on right, gradual curve to left

Описание русла ниже станции:

Gradual widening before emptying into Ottawa r.; main current on left, slight backwater on right

Описание левого берега:

Approx. 3 m drop to river; slope allows only shrubby vegetation

Описание правого берега:

Edge of park land; gentle slope

Дно: скальное, гравистое, песчаное, чистое, заросшее:

Probably wood chips; muddy

Приблизительные размеры и описание озер и/или водохранилищ:

Нет

НАБЛЮДЕНИЯ

Естественные условия и/или искусственные сооружение, которые могут влиять на режим стока:

Baskatong dam

Farmers rapids

Источники физических и химических сбросов:

Logs, local sewage input

Рисунок 21.1 — Формы для описания местонахождения станции (продолжение).

могут быть описаны как скалистые, илистые, песчаные, покрытые растительностью и т.д. Описания расположения станций должны отмечать сезонные изменения, которые могут затруднять сбор данных в течении года. Дополнительная информация относительно озер может включать площадь водной поверхности озера, максимальную и среднюю глубины, объем, время наполнения.

Также должны быть указаны дополнительные сведения об естественных вызванных деятельностью человека условиях, которые могут сказываться на данных наблюдений. Необходимо описать, кроме того, имевшие место и ожидаемые в будущем нарушения земной поверхности и источники загрязнения; например лесные пожары, постройка дорог, разработка старых шахт, а также существующее и ожидаемое землепользование.

#### 21.2.2.2 Подробная схема расположения станции.

Необходимо подготовить план расположения и разбивки станции (включая расстояние, выраженное в соответствующих единицах) относительно местных ориентиров и постоянных точек отсчета (см.рис.21.2). На чертеже должны быть отчетливо указаны пункты отбора проб или измерений и расположение оборудования.

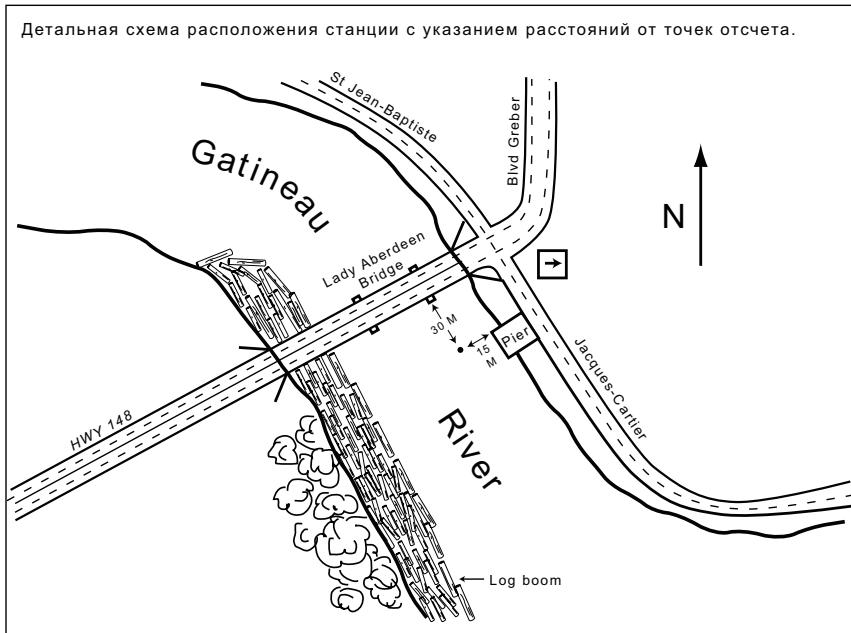


Рисунок 21.2 — Схема расположения станции.

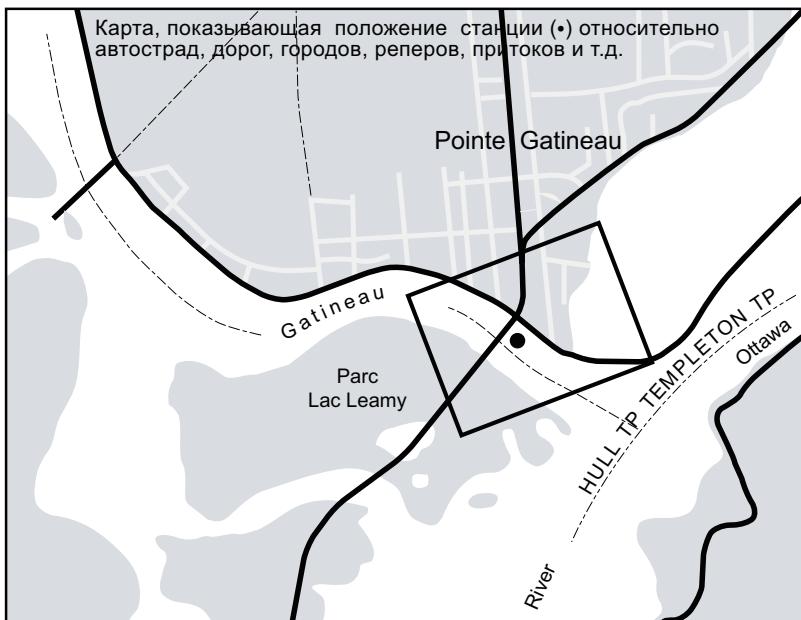


Рисунок 21.3 — Карта местоположения станции.

#### 21.2.2.3 *Карта.*

Должна быть составлена крупномасштабная карта расположения станции (рис21.3), которая показывает ее расположение относительно дорог, автострад и городов. Сочетание карты и схемы расположения станции должно обеспечить полную информацию об ее местоположении. Исследователь, который впервые едет на станцию должен иметь достаточно информации, чтобы легко и уверенно найти ее.

#### 21.2.2.4 *Координаты.*

Географические координаты указываются в виде широты и долготы в универсальной системе координат, а если участок находится на реке, то указывается также его расстояние вверх по течению от точки отсчета, например от эталонной станции или устья реки. Следует, по возможности, указывать государственные эталонные сети. По международной системе GLOWDAT (т.е. для станции банка данных ГСМОС/Вода [3] ) одна запись представляет собой код ВМО для октанта (восьмая часть круга) земного шара в северном полушарии: 0, 1, 2 и 3 для 0-90 и 90-180 градусов западной долготы, 180-90 и 90-0 восточной долготы соответственно [5]. Для южного полушария коды соответственно следующие: 5, 6, 7 и 8 для 0-90 3, 90-180 3, 180-90 В и 90-0 В [3].

Значения широты и долготы следует получать из топографических карт, масштабом 1 : 50 000 или 1 : 250 000. На последней карте пункты могут быть расположены с точностью до  $\pm 200$  м, а на карте 1 : 50 000 — с точностью до  $\pm 40$  м [3]. Если имеются навигационные карты, то ими пользоваться лучше, ибо они точнее топографических.

#### 21.2.2.5 *Порядок описания*

Порядок описания участков для измерения расхода и качества воды рекомендуется начинать с названия реки, водотока, озера или водохранилища, после чего указать их положение (например вверх или вниз по течению) и его расстояние до ближайшего населенного пункта, важного моста, шоссейной дороги или других фиксированных ориентиров (с точностью не менее 0,1 км). Также необходимо дать название провинции, территории или других geopolитических подразделений.

Для обеспечения исторического описания участка и репрезентативного района, который он характеризует, необходимо добавить информацию, касающуюся изменений на участке, включая также изменения в приборах. В главе 25 содержится пример рекомендуемого формата для такой информации.

### 21.3 *Частота и время посещения станций*

Частота и время посещения станций для снятия показаний определяются предполагаемым использованием этих данных и должны быть достаточными для обеспечения наблюдений в течение всего времени. Таким образом, целью посещений станции является проведение наблюдений, сбор данных или обслуживание.

Если переменная, которая является объектом исследования на участке, меняется быстро, то посещения неавтоматических станций должны быть более частыми, чтобы получить ценную информацию. В этих случаях, при наличии фондов и квалифицированного персонала, лучше установить автоматическую записывающую аппаратуру. Это относится, в первую очередь, к осадкам и уровням воды, где для гидрологических целей желательны более частые наблюдения во время ливней, паводков и приливных явлений.

#### 21.3.1 *Неавтоматические станции*

Имеется особый смысл в том, чтобы на климатических и гидрометрических станциях наблюдения проводились в определенные синоптические сроки. На основании публикации ВМО [6] время, в которое на синоптических станциях проводятся 3-часовые и 6-часовые наблюдения погоды, — следующее: 0000, 0300, 0600, 0900, 1200, 1500, 1800 и 2100 ВКВ. В большинстве стран такие станции являются ключевыми станциями в метеорологических и климатических программах наблюдений. Если наблюдателю надо провести три наблюдения в день, то самыми удобными синоптическими часами для этого будет время утром,

вечером и около полудня. Для станций, где в день проводится только 1–2 наблюдения, надо выбрать для этого определенные часы. На станциях, где проводится одно наблюдение в день, рекомендуется проводить его утром.

Желательно проводить регулярные наблюдения в синоптические сроки, хотя в некоторых случаях это бывает невозможно. Тогда важно, чтобы наблюдения проводились каждый день в одно и то же время, и это время должно быть записано в ВКВ или в местном стандартном времени, используя деление суток на 24 часа. Если «летнее время» (время экономии дневного света) вводится на часть года, необходимо принять меры, чтобы наблюдения проводились в тот же час по ВКВ, как в течение периода до и после «летнего времени».

Запись времени наблюдения должна быть сделана после проведения наблюдения. Наблюдение должно быть выполнено, по возможности, в течение 10 минут до регистрации времени. Однако, независимо от того, в стандартное или нестандартное время проводятся наблюдения, важно, чтобы фактическое время проведения наблюдений было записано очень тщательно. На приливных участках реки время наблюдений должно соотноситься с приливным циклом.

### 21.3.2 *Автоматические станции*

Частота и время посещения таких станций определяются продолжительностью того периода, когда станция может функционировать самостоятельно без обслуживания. Например, некоторые самописцы длительной записи дождя делают записи на ленты, рассчитанные на неделю, и, следовательно, требуют еженедельных посещений для того, чтобы снимать и заменять ленты. Другие приборы могут хранить записи данных наблюдений гораздо дольше и поэтому требуют менее частых посещений. Слишком долгие перерывы между посещениями могут привести к частой порче приборов и, следовательно, к потере информации, вместе с тем частые посещения дороги и требуют большей затраты времени. Проводятся различные исследования для установления эффективности затрат и продуктивности сбора информации. Подробности приведены в публикации ВМО *Economic and Social Benefits of Meteorological and Hydrological Services* [7] (Экономическая и социальная эффективность метеорологических и гидрологических служб).

Частота посещений может также определяться точностью собираемых данных. В некоторых записывающих устройствах может нарушаться соответствие между наблюдаемой переменной и записанной величиной. Примером этому может служить нестабильная зависимость между уровнем и расходом воды. В таких случаях требуется периодическое посещение станции для перетарировки оборудования, посредством которого производятся измерения.

Занесение показаний приборов в логгеры и передача данных по телефонной или спутниковой связи могут оказать большое влияние на частоту проверок станций (раздел 21.5.3). Однако следует отметить, что для обеспечения качества информации требуется регулярное обслуживание станции.

## 21.4 Обслуживание участков наблюдений

Для того чтобы качество получаемой информации было адекватным (т. е. достаточным и удовлетворительным), на участках измерений необходимо регулярно проводить следующие мероприятия, которые осуществляются непосредственно наблюдателем, ответственным за участок. Однако изредка они могут выполняться инспектором (раздел 22.1.1).

На всех наблюдательных участках необходимо:

- a) содержать в хорошем состоянии приборы;
- b) заменять или настраивать приборы, по мере необходимости;
- c) считывать и записывать наблюдения;
- d) проводить рекомендуемые проверки полученных записей;
- e) проводить общую проверку всего оборудования (например линий передач и пр.);
- f) проверять и обслуживать участок в соответствии с его назначением;
- g) проверять и содержать в порядке подход к станции;
- h) вести запись всей вышеназванной деятельности;
- i) отмечать изменения в использовании земли или растительности;
- j) очищать все части оборудования от зарастания и загрязнения.

На речных гидростворах следует:

- a) по мере надобности проверять стабильность берегов;
- b) по мере надобности проверять уровень и состояние створных знаков;
- c) по мере необходимости проверять и держать в хорошем состоянии устройства для измерения течения ( гидрометрические люльки и др.);
- d) по мере необходимости проверять и ремонтировать контрольные сооружения;
- e) регулярно проводить съемки живого сечения и фотографировать значительные изменения на станции после каких-либо явлений природы или в связи с переменами в растительности или использовании земли;
- f) вести конспективную запись всей вышеперечисленной деятельности и указывать ее результаты;
- g) инспектировать районы вокруг или выше участка и фиксировать любые значительные изменения в использовании земли или другие изменения, имеющие отношение к гидрологическим характеристикам.

Подробную информацию можно найти в WMO *Manual on Stream Gauging* [8] (Наставление ВМО по измерению расхода воды).

Из-за непредсказуемой природы наводнений измерение паводков не может быть запланировано как часть общей инспекционной поездки. План действий во время наводнений должен составляться перед началом штормового сезона и должен включать приоритетные створы и типы требуемой информации. Если на

гидростворе потребуется измерение паводка, к этому надо готовиться заранее во время сухого сезона, чтобы быть готовым во время наводнения. Подготовка требует следующих мер:

- a) обновить подходы к участку наблюдений (в случае необходимости сделать площадку для вертолета);
- b) обеспечить провизией временный лагерь на участке;
- c) подготовить и проверить измерительное оборудование.

## 21.5        **Наблюдения**

Компоненты сбора данных перечислены в таблице 21.2.

### 21.5.1      **Неавтоматические станции**

Как минимум, наблюдатели должны быть обеспечены полевыми книжками и/или станционными журналами, куда вносятся записи по мере проведения наблюдений. Наблюдатель должен также получить бланки, которые позволили бы ему вести записи ежедневно, еженедельно, раз в две недели или раз в месяц, в зависимости от установленных правил. Полевая книжка и станционный журнал должны всегда храниться у наблюдателя на случай, если пересылаемые материалы потеряются в пути.

Бланки для передачи сведений должны быть составлены таким образом, чтобы в них легко было переписывать результаты из полевой книжки или станционного журнала. Удобно, если страницы бланка соответствуют страницам полевой книжки. По крайней мере, различные элементы в этих документах могут быть в тех же колонках и графах. В журнале, а возможно и в бланке для передачи сведений, должно быть оставлено место для изменений или поправок первоначальных записей.

Другой вариант ведения книжки записей — использование копировальной бумаги, вложенной между страницами, это облегчает подготовку копии, которую можно будет оставить на местной станции. Такой способ не очень практичен, так как влага может легко уничтожить или серьезно испортить сделанные записи. В случае автоматической обработки данных, формы подачи сведений должны предусматривать запись кодируемой информации, пригодной для компьютера.

Ценность данных может быть значительно увеличена или уменьшена, в зависимости от уровня сопровождающей документации. Наблюдателям рекомендуется давать свои комментарии по поводу тех внешних факторов, которые могут влиять на наблюдения, это может относиться к оборудованию, экспозиции или какому-то кратковременному явлению. Кроме того, форматы и формы всех вложенных бумаг должны быть такими, чтобы рядом с заключительными итоговыми данными было место для подробных комментариев. Важно, чтобы в публикуемых комментариях использовалась стандартная терминология и точный словарь, который применяется в полевых наблюдениях.

Таблица 21.2  
Компоненты сбора данных

Восприятие	Получение данных	Сбор данных	Передача данных
	Запись		
1. Зрительное: водомерное устройство, землемерование, описание участка, состав почвы	1. Полевая книжка: текстовое описание и элементы или величины параметров	1. Ручная: полевые наблюдатели почтовая служба телефон	
2. Механическое: осадкомеры, термометры, вертушки, инфильтрометр	2. Лист полевых данных: вопросы, предназначенные для частичного текстового описания и значения элементов или параметров могут быть заранее закодированы для ввода в компьютер	2. Автоматическая (телеметрия): телефон специальные наземные линии радио спутники	
3. Электрическое: термистор, радиометр, датчики давления, зонд проводимости	3. Графики: ленты самописца с непрерывной записью значения элемента		
	4. Средства, совместимые с компьютером: a) запись вручную: формы с отметкой нужного значения формы с выбранным вариантом b) автоматическая запись: кассета бумажная лента винчестер		

ПРИМЕЧАНИЕ. Таблица относится к элементам и параметрам, наблюдаемым в поле. Имеются особые группы данных, например для почв и для качества воды, там, где проводится лабораторный анализ физических проб. Здесь система сбора данных почти неизменно будет такая:

- a) механический отбор проб;
- b) блокнот или книжка для полевых данных.

Целесообразно установить определенную систему обработки данных, при которой, по мере проведения наблюдений, проводится кодирование качества, о чем делаются соответственные пометки. Это особенно относится к неавтоматическим наблюдениям, когда желательно давать комментарии при непосредственном наблюдении. Последние достижения, сводящие до минимума ошибки обработки данных полевых записей измерений, включают оптические приборы считывания и портативные полевые компьютеры, которые позволяют закладывать данные наблюдений прямо в компьютер и автоматически проверять качество данных.

Полевые наблюдения, которые могут быть полезны при интерпретации качества воды, также должны быть включены в отчет. Эти наблюдения могут относиться к необычному цвету или запаху воды, чрезмерному росту водорослей, маслянистости, налету на поверхности воды, большому количеству мертвых рыб. Такие наблюдения могут подсказать исследователю, что необходимо провести дополнительные отборы проб, помимо тех, которые предусмотрены программой. Типы проб и их сохранение, а также анализ, проведенный исследователем, диктуются преобладающими условиями. Если дополнительные пробы берутся на участках, не относящихся к станции, их место должно быть указано особенно точно. Этот вид информации и дополнительные пробы могут быть очень полезны на стадии интерпретации данных.

#### 21.5.2 *Автоматические станции*

На автоматических записывающих станциях наблюдения записываются в графической или цифровой форме. Однако при посещении станции для получения данных или для ее обслуживания необходимо регистрировать следующие данные:

- a) идентификационный номер участка;
- b) наблюдения, полученные от независимых источников (например, по водомерной рейке, общее количество собранных осадков);
- c) особые замечания по работе записывающих механизмов, включая их состояние и время.

При каждой проверке необходимо заполнить специальный инспекционный лист станции. Итог записанных данных наблюдений надо подвести на компьютере. Однако при сборе данных в поле записанные данные следует проверить также визуально или с помощью переносного компьютера, если они были записаны в форме, пригодной для компьютерной обработки. Если замечены какие-либо ошибки, их необходимо отметить в ленте или инспекционном листе.

В графических самописцах сбор данных идет непрерывно, нужна только текущая обработка данных. Однако регистратор данных производит запись через определенные интервалы времени (по заказу потребителя). Разумно допускать вариации во времени наблюдения, как того требуют собираемые данные. Если имеется много наблюдаемых параметров, то также может понадобиться

корректировка наблюдений. Например, данные о выпадении осадков можно записывать каждые 5 минут, а можно фиксировать наполнение ведра (данные об уровне воды) при изменении уровня более чем на 1 см; параметры качества воды, — когда уровень воды изменяется на 10 см и/или ежесуточно (раздел 6.2.4).

Так же, как и для графического самописца, необходимо проводить еще и независимые полевые наблюдения, которые следует записывать при каждом посещении.

После того как станция проработала значительный период времени, частоту и время инспекций следует изменить с учетом возможностей оборудования и в связи с необходимостью получения данных с этого участка. В некоторых случаях следует рассмотреть возможность непосредственного получения данных в масштабе реального времени по различным каналам связи, как более дешевого метода сбора информации, по сравнению с регулярными посещениями участка (раздел 21.6).

### ***21.5.3 Передача информации в реальном масштабе времени***

Существует много автоматических и неавтоматических станций, от которых требуется данные в реальном масштабе времени, например: при эксплуатации водохранилищ, при предупреждении о наводнениях, при прогнозах и в ряде других случаев, где этот метод является экономически эффективным методом сбора данных.

Данные в реальном времени, полученные наблюдателями, должны передаваться в агентство по существующим каналам связи. Точно также и автоматические станции должны передавать данные наблюдений. Самописцы могут быть приспособлены и оборудованы для передачи данных об изменениях параметров через определенные интервалы времени. Они могут также по запросу заказчика определять текущую ситуацию и менять интервалы времени наблюдений. Регистраторы данных могут давать информацию о емкости памяти записывающего устройства и о состоянии энергообеспечения. В этих случаях можно разработать процесс автоматического контроля качества.

### ***21.5.4 Дополнительные инструкции для наблюдателей***

Все наблюдатели должны получить четко составленные инструкции. Они должны содержать рекомендации и указания по следующим вопросам:

- a) краткое описание приборов с чертежами;
- b) стандартный уход и содержание приборов и меры, которые необходимо принимать в случае их поломки и серьезной неисправности;
- c) процедура проведения наблюдений;
- d) время стандартных наблюдений;
- e) критерии начала и окончания, а также частота особых специальных наблюдений (например, за уровнем воды в реке, когда этот уровень выше ординара);
- f) процедуры по проверке времени и нанесении контрольных наблюдений на ленты на станциях с самописцами;

- g) заполнение полевых книжек и станционных журналов;
- h) заполнение бланков, включая и методы расчета средних величин и общей суммы с соответствующими примерами;
- i) отправка результатов наблюдений в центральный офис.

Такие письменные инструкции должны сопровождаться устными разъяснениями инспектора, которые он дает наблюдателю при установке оборудования и затем через регулярные периоды времени.

Эти разъяснения должны подчеркивать важность регулярных наблюдений и краткой информации о том, как данные наблюдений используются при изучении водных ресурсов, в гидрологических прогнозах и при контроле паводков. Отдельно необходимо обсудить проведение любых специальных наблюдений, которые могут понадобиться в какие-то особые периоды, например во время паводков или при подготовке специальных отчетов. Наблюдателям следует напомнить, чтобы они не забывали указывать на бланках название станции, ставить дату и свою подпись. Следует также подчеркнуть, что необходимо немедленно сообщать о неполадках в оборудовании или о каких-то серьезных изменениях на наблюдательном участке.

На станциях с автоматической записывающей аппаратурой, наблюдателей надо снабжать инструкцией, объясняющей методику замены лент и методику проведения проверки наблюдений. Эти инструкции должны подчеркивать важность примечаний на лентах, которые могут понадобиться при обработке. Сюда входит идентификация станции, время включения самописца, время его отключения, показания контрольного водомерного поста и любые другие примечания, которые в будущем облегчат расшифровку записей.

На станциях со штатным персоналом, сотрудников следует обучать чтению лент и работе с самописцами. Для таких станций необходимо тщательно разработать инструкцию и методику чтения данных с лент и заполнения отчетных бланков. Однако на многих станциях, где персонал недостаточно обучен, ему нельзя поручать такую ответственную работу, как снятие данных с лент самописца. В таких случаях ленты следует отсылать для обработки в центр.

Во многих странах действуют устройства для измерения уровня воды, для наблюдений за качеством воды и осадками, выдающие данные в цифровом виде. В этих случаях инструкция для наблюдателей должна содержать только информацию об обычном обслуживании, о контрольных наблюдениях и о методах передачи записанных данных в центр для машинной обработки.

## 21.6 Системы передачи информации

### 21.6.1 Общие положения

За последние годы требования к гидрологической информации значительно усложнились, и в государственные сети были включены системы с автоматической передачей гидрологических наблюдений. Это привело к необходимости разработки

кодов, облегчающих подготовку форматов для передачи наблюдений и распространения прогнозов. Гидрологические коды HYDRA (Гидрологические данные) и HYFOR (Гидрологические прогнозы) рассматриваются в разделе 4.4. Ниже приводится перечень возможностей систем передачи информации (дополнительные подробности можно найти в разделе 6.2.4):

- a) неавтоматическая станция: наблюдатель отсылает данные в центр по почте или сообщает их по телефону или по радио, согласно предварительной договоренности;
- b) неавтоматическая/полуавтоматическая станция: по телефону, по радио, по радиотелефону или через спутник центр запрашивает удаленные автоматические станции и тут же получает ответы в виде конкретных величин. В центре может быть аппаратура, обеспечивающая автоматический набор номера телефона, которая может проводить серию таких телефонных звонков;
- c) автоматические станции, запрограммированные на определенное время: автоматическое оборудование запрограммировано на выдачу информации после отдельного единичного наблюдения и/или наблюдений, хранящихся в запоминающем устройстве;
- d) автоматический показатель события: станция передает автоматически по радио, телефону или через спутник то изменение, которое имело место в переменной (например изменение на каждый сантиметр уровня воды);
- e) автоматическая станция: данные непрерывно передаются и непрерывно записываются в центре.

### 21.6.2 *Системы связи*

Возможные системы передачи:

- a) специальные наземные линии: применяются на сравнительно коротких расстояниях, где нельзя использовать коммерческие линии. Наземные линии могут передавать частоты до 3 000 Гц без какой-либо специальной техники;
- b) коммерческие телефонные и телеграфные линии: всюду, где можно, используется телефонная и телеграфная системы. Имеется оборудование, которое обеспечивает автоматическое получение данных в центре. Изменения и команды передаются из удаленных участков в центр и обратно;
- c) прямая радиосвязь: используется там, где нельзя обойтись наземными линиями, или когда расстояния или естественные препятствия мешают протянуть провода. Радиопередатчики могут быть использованы на расстояниях от нескольких километров до ста километров, в зависимости от мощности передатчика и от частоты носителя. При более высоких частотах передатчик и приемник должны иметь свободную линию передач. Это

ограничивает диапазон связи без промежуточных станций до 50 км. Во всех случаях установка и работа радиопередатчиков подлежит государственному и международному регулированию;

- d) спутниковая связь: передача данных со спутника может осуществляться двумя способами: передача данных, наблюдаемых чувствительными элементами на спутнике (такие, как изображения), или использование спутника для передачи данных с далеких земных станций на центральные приемные установки. В настоящее время способы наблюдения и передачи со спутников развиваются очень быстро, например через Глобальную систему телесвязи Всемирной службы погоды ВМО, данные при этом можно получить прямо с космического спутника или через центральный банк данных.

#### 21.6.3 *Факторы, влияющие на выбор системы передачи информации*

Рассматривая возможности использования автоматической передачи данных в любой измерительной системе, необходимо учитывать следующее:

- a) скорость получения данных, что зависит от следующих факторов:
- i) скорость изменений измеряемой переменной;
  - ii) промежутки времени между наблюдением и получением данных обычными средствами по сравнению с системами автоматической передачи;
  - iii) необходимая срочность получения данной информации для предупреждений или прогнозов;
  - iv) выгода от прогнозов на основании данных телеметрии и убытки, вызванные отсутствием или задержкой прогнозов;
  - v) преимущества радио- и спутниковой передачи по сравнению с наземными линиями во время штормов и наводнений, когда эти бедствия могут вывести из строя средства телекоммуникаций в то время, когда данная информация крайне необходима;
- b) доступность измерительных участков для контроля качества и для обслуживания;
- c) надежность записывающих устройств, т. к. в суровых климатических условиях эксплуатация механического оборудования бывает очень затруднена. В этих случаях надежнее записывать и передавать информацию с использованием электроники. Такая система, кроме того, позволяет проводить непрерывную проверку датчиков с использованием сенсоров;
- d) укомплектованность штата для работы, обслуживания и снабжения — важно, чтобы эти аспекты рассматривались в процессе планирования, и, как правило, каждый отдельный проект имеет свои особенности. Необходимо тщательно рассмотреть все альтернативные решения, оценить их полезность и требуемые затраты прежде, чем принимать окончательное решение. При проектировании системы автоматической передачи информации в вопросах комплектования штата для работы необходимо учесть следующее:
- i) датчики и кодирующее оборудование;

- ii) системы передачи;
- iii) приемное и декодирующее оборудование.

На стадии проектирования все эти компоненты следует рассматривать в совокупности. Это очень важно, ибо особые характеристики какого-то одного компонента могут оказать влияние на решение, принимаемое в отношении других компонентов.

## 21.7 Мониторинг качества воды

В главе 17 настоящего Руководства дается подробное описание приборов и полевой практики сбора данных о качестве воды. Однако положение пробоотборных участков, время пробоотбора, способ определения параметров и все соответствующие величины должны быть зафиксированы, а вся работа с данными должна проходить согласованно. Если пропустить что-то одно, вся работа будет напрасной.

### 21.7.1 Идентификация станции

Важность точного описания расположения каждой станции и условий пробоотбора рассмотрена в разделе 21.2.2.

### 21.7.2 Полевые бланки для мониторинга качества воды

Пожалуй, одним из самых важных шагов при составлении программы пробоотбора является запись на полевых бланках даты, времени, места взятия пробы и сделанных измерений. Все полевые записи должны быть сделаны до ухода со станции. Дополнительные инструкции содержатся в разделе 21.5.

Два примера форматных бланков для записи полевых анализов и наблюдений показаны на рисунках 21.4 и 21.5. Бланки, приведенные на этих рисунках, подходят для тех групп, которые для хранения результатов используют компьютерные системы. Бланк на рисунке 21.4 может быть использован любой группой, которая собирает данные о качестве воды. Оба бланка могут быть приспособлены для особых ситуаций. Обычно записывается следующая информация:

- a) участок пробоотбора и дата;
- b) параметры, измеряемые в поле;
- c) тарирование прибора;
- d) прибор и процедура отбора проб;
- e) меры по контролю качества;
- f) общие замечания и полевые наблюдения.

### 21.7.3 Транспортировка проб на качество воды

После отбора некоторые пробы воды должны быть доставлены в лабораторию. Способ транспортировки будет зависеть от географического положения и от

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ВОДЫ										
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПОЛЕ										
СТАНЦИЯ					ЛАБОРАТОРНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ					
					CARD TYPE 04A 1 3	Station number type prov basins bas sequential 0 0 0 0 4	Sample number lab yr sequential 36 45	number 0330 53	Данные получены - - -	
СТАНЦИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ №.					Date of sampling day mo yr hr min sec zone 19 31 42 43 44	prec freq 1 90		54 57	Конец получения - - - данных	
ЗАМЕЧАНИЯ : - - - - -					Temperature (air °C) 97060S 1 1 1	Temperature 020611L	Sulphate diss mg/l 163016L			
КОЛЛЕКТОР : - - - - -					pH 103011L	Nitrogen diss NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> mg/l n 0171110L				
ПРОВЕРИЛ : - - - - -					Specific conductance us/cm 1103011S 1 1 1	Residue nonfil 1105 °C mg/l 1040111L				
ДАТА : - - - - -					Turbidity 020713L	Residue filterable 1105 °C mg/l 1045111L				
					Colour 020111L	Residue fixed nonfil 1550 °C mg/l 1050111L				
					Alk phenolphth mg/l CaCO <sub>3</sub> 101511L	Residue fixed fil 1150 °C mg/l 1015151L				
					Alk total mg/l CaCO <sub>3</sub> 101101L	Arsenic extrble mg/l 3133014L				
					Hardness total mg/l CaCO <sub>3</sub> 106103L	Selenium extrble mg/l 3143102L				
					Calcium diss mg/l 201101L	Cadmium extrble mg/l 418310L				
					Magnesium diss mg/l 121108L	Copper extrble mg/l 219310L				
					Potassium diss mg/l 191103L	Zinc extrble mg/l 310310L				
					Sodium diss mg/l 111103L	Iron extrble mg/l 216310L				
					Chloride diss mg/l 117206L	Lead extrble mg/l 812310L				
					Fluoride diss mg/l 09106L	Manganese extrble mg/l 215310L				
					Silica reactive mg/l SO <sub>2</sub> 141105L	Mercury extrble mg/l 810311L				

Рисунок 21.4 — Полевой бланк для работы с NAQUADAT или подобной компьютерной системой.

максимального промежуточного времени, которое допустимо с момента отбора пробы до анализа. Полевой исследователь отвечает за доставку проб на авиалинию, к автобусу, поезду или почтовое отделение, согласно плану, с тем чтобы на транспортировку пробы было затрачено минимум времени. Расчеты на перевоз и хранение пробы должны быть определены заранее, до начала полевых работ.

#### 21.7.4 Обеспечение качества полевых работ при мониторинге качества воды.

Программа обеспечения качества полевых работ это систематический процесс, который наряду с лабораторными программами и программами хранения и обеспечения качества проб, гарантируют определенную степень точности и сохранности отобранных данных. Полевая программа гарантии качества включает ряд мер.

СТАНЦИЯ № \_\_\_\_\_  
ОПИСАНИЕ \_\_\_\_\_

ДАТА ОТБОРА ПРОБ ДЕНЬ \_\_\_\_\_ МЕСЯЦ \_\_\_\_\_ ГОД \_\_\_\_\_  
ВРЕМЯ ОТБОРА ПРОБ ЧАСЫ \_\_\_\_\_ МИНУТЫ \_\_\_\_\_ ВРЕМЕННАЯ ЗОНА \_\_\_\_\_  
ОТБОР ПРОБ ПРОИЗВЕЛ \_\_\_\_\_

#### ИЗМЕРЕННЫЕ В ПОЛЕ ПАРАМЕТРЫ

Температура воды °C \_\_\_\_\_ Температура воздуха °C \_\_\_\_\_  
рН \_\_\_\_\_ Особые условия \_\_\_\_\_ Растворенный кислород \_\_\_\_\_ Мутность \_\_\_\_\_  
Глубина воды \_\_\_\_\_ Глубина пробоотбора \_\_\_\_\_  
Толщина льда \_\_\_\_\_  
Прочее \_\_\_\_\_  
Замечания \_\_\_\_\_

#### ТАРИРОВКА ИНСТРУМЕНТА

Модель измерителя растворенного кислорода \_\_\_\_\_ Тарирование Винклера \_\_\_\_\_ мг·л<sup>-1</sup>  
Показания измерителя перед включением \_\_\_\_\_  
Модель измерителя проводимости \_\_\_\_\_  
Модель измерителя рН \_\_\_\_\_ Используемое тарирование Баттерса \_\_\_\_\_  
Замечания \_\_\_\_\_

#### ДАННЫЕ ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ

Описание места \_\_\_\_\_

Описание водомерного поста \_\_\_\_\_

Высота уровня \_\_\_\_\_  
Время \_\_\_\_\_

Рисунок 21.5 — Обычный бланк листа отбора проб в полевых условиях

**ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ПРОБООТБОРНИК И ПРОЦЕДУРЫ**

---

---

---

---

**ОСОБЕННОСТИ ОТБОРА ПРОБ**

Материал сосуда

Собранный объем

Консервация

Контроль качества

Главные ионы

Металлы

Органические вещества

Пестициды и гербициды

Ртуть

Фенолы

Питательные вещества

БПК и ХПК

Прочее

ЗАМЕЧАНИЯ ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА \_\_\_\_\_

---

---

ОБЩИЕ ЗАМЕЧЕНИЯ \_\_\_\_\_

---

---

СПОСОБ ТРАНСПОРТИРОВКИ \_\_\_\_\_

Рисунок 21.5 — Обычный бланк листа отбора проб в полевых условиях (*продолжение*)

Все оборудование должно содержаться в чистоте и хорошем рабочем состоянии, должны также храниться записи о результатах тарирования и профилактическом ремонте; а стандартизированные и утвержденные методики, такие, как рекомендованы в настоящем *Руководстве*, должны неукоснительно выполняться полевым персоналом.

Качество данных, выдаваемых лабораторией, зависит от целостности проб, поступающих в лабораторию. Следовательно, исследователь в поле должен принимать все меры предосторожности, чтобы уберечь пробы от загрязнения и порчи. Дальнейшие подробности по вопросу гарантии качества в поле даны в главе 17 и в *WMO Manual on Water Quality Monitoring — Planning and Implementation of Sampling and Field Testing* [9] (Наставление ВМО по мониторингу качества воды — планирование и осуществление отбора проб и полевого тестирования).

## 21.8 Сбор специальных данных

### 21.8.1 Предъявляемые требования

Данные о сильных ливнях и наводнениях очень важны при определении критерия проектирования многих типов гидравлических объектов. Вообще сети регулярного наблюдения не обеспечивают достаточно подробной информации о распределении ливневых дождей или о расходе воды при пике паводка. Кроме того, при сильных паводках постоянные водомерные устройства иногда заливаются, или их смывает и уносит, и тогда все данные пропадают. Поэтому очень ценная информация может быть получена бригадой, проводящей полевые съемки в районах, сразу после паводка. Помимо этого, в гидрологических исследованиях часто бывают полезны данные, полученные с использованием таких приборов, как метеорологические радиолокаторы (раздел 7.6).

### 21.8.2 Дополнительные измерения ливневых осадков

Измерения осадков с использованием отдельных, нестандартных осадкомеров, таких, как ведра, ложбины, бочки и пр. (если есть уверенность в том, что до начала ливня они были пустыми), также могут быть использованы, и таким образом дополняют данные, полученные от регулярной сети наблюдений. Можно использовать и показания очевидцев о времени начала и окончания дождя, и о его интенсивности. Во всех случаях надо очень осторожно подходить к трактовке всех этих данных, и если между ними и показаниями регулярной сети имеются расхождения, последней следует доверять больше.

### 21.8.3 Данные от метеорологических радиолокаторов и спутников

При определении интенсивности дождя и его распределения по площади, а также при определении времени начала и окончания осадков в каком-то бассейне реки, данные, полученные от метеорологических радиолокаторов и со

спутников, являются весьма ценными. Данные, необходимые для записи, можно получить на фотопленку или в цифровой форме от радиолокатора через компьютер. На фотопленку данные можно собирать постоянно, с перерывами или в виде отдельных отобранных фотографий. Сюда могут быть включены фотографии комплексного видеообработчика (КВО), которые показывают одновременно несколько уровней интенсивности контура, радиоэхо, а также все данные нетарированного метеорологического радиолокатора. Гидрометеорологическое применение данных фотопленки все же ограничено из-за времени, которое требуется на проявление пленки и трудоемкости ее ручной обработки, тогда как цифровая форма данных радиолокатора дает возможность проведения быстрых и многочисленных исследований путем компьютерной обработки информации. Эти цифровые данные могут быть сразу же переданы в бюро прогнозов через телеграфную буквопечатающую аппаратуру или через компьютерную сеть.

#### 21.8.4 *Экстремальные уровни и расходы воды в реке*

Экстремальные события во время паводков и засух должны быть зафиксированы и на регулярных водомерных станциях, и на участках, где измерения не проводятся.

Отметки высокой воды на реке полезны для картирования затопленных районов, при проектировании гидротехнических сооружений, таких, как шлюзовые мосты, и для расчета уклона паводков. Эти отметки, если они сделаны тщательно, могут вместе с другими данными быть использованы для расчета максимального расхода косвенными методами (раздел 11.6).

Полевые съемки для измерения максимального стока в местах, где нет водомерных постов, дают ценную информацию при минимальных затратах. Эти измеренные расходы могут быть соотнесены с одновременными расходами на индексированных водомерных станциях для определения характеристик минимального стока на участках, где не проводятся постоянные измерения.

#### Список литературы

1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1978: *Water Quality Surveys: A Guide for the Collection and Interpretation of Water Quality Data*. Prepared for the IHD-WHO Working Group on Quality of Water for Unesco and WHO with assistance from UNEP.
2. World Meteorological Organization, 1987: *Hydrological Information Referral Service—INFOHYDRO Manual*. Operational Hydrology Report No. 28, WMO-No. 683, Geneva.
3. United Nations Environment Programme/World Health Organization/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological

- Organization, 1992: *Global Environment Monitoring System (GEMS)/WATER Operational Guide*. Canada Centre for Inland Waters, Burlington, Ontario.
4. Environment Canada, 1983: *Sampling for Water Quality*. Water Quality Branch, Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa.
  5. World Meteorological Organization, 1981: *Hydrological Data Transmission* (A. F. Flanders). Operational Hydrology Report No. 14, WMO-No. 559, Geneva.
  6. World Meteorological Organization, 1981: *Manual on the Global Observing System*. Volume I, WMO-No. 544, Geneva.
  7. World Meteorological Organization, 1990: Economic and social benefits of meteorological and hydrological services. *Proceedings of the Technical Conference*, 26-30 March 1990, Geneva, WMO-No. 733, Geneva.
  8. World Meteorological Organization, 1980: *Manual on Stream Gauging*. Volumes I and II, Operational Hydrology Report No. 13, WMO-No. 519, Geneva.
  9. World Meteorological Organization, 1988: *Manual on Water Quality Monitoring — Planning and Implementation of Sampling and Field Testing*. Operational Hydrology Report No. 27, WMO-No. 680, Geneva.

## ГЛАВА 22

### ПРОВЕРКА И КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ

#### 22.1        **Контроль качества и обнаружение ошибок**

Контроль качества начинается с выбора инструментальной базы и участка для проведения наблюдений. Целью контроля качества является обеспечение наиболее высокого стандарта первичных данных до их передачи потребителю.

##### 22.1.1      *Инспекция станций*

Для обеспечения хорошего качества наблюдений важно проводить на станциях периодические инспекции для проверки правильной работы приборов и получения высокого уровня наблюдений. Данные водомерных наблюдений на гидрометрических станциях и пунктах измерения подземных вод следует проверять, по крайней мере, один раз в год. Такие инспекции можно проводить независимо от обычных инспекционных проверок. В некоторых странах региональные структуры проводят инспекции, хотя бы один раз в год, а центральные — более редко.

Для гидрометрической станции такие инспекции проверяют устойчивость тарировочной кривой, связь между водомерными постами и уровень нуля графика поста для того, чтобы убедиться в постоянстве отметок. Другие обязанности инспекции перечислены ниже. Поскольку на гидрометрических станциях рекомендуется проводить не менее 10 измерений расхода воды в год, большинство из них проверяются примерно с одинаковой частотой. Инспекции на любой гидрометрической станции должны проводиться, по меньшей мере, дважды в год. Кроме того, следует предусмотреть инспекции станций после экстремальных паводков, которые должны осуществляться опытными специалистами для того, чтобы проверить устойчивость участка русла и водомерных постов. В некоторых случаях сам наблюдатель должен уметь проводить такой контроль во время сбора данных и посещения постов (раздел 21.4).

В обязанности инспектора входит:

- a) отмечать и фиксировать любые изменения на участке наблюдений (при этом желательны карта-схема и фотографии);
- b) на месте договариваться об улучшении или восстановлении участка наблюдений (например, убрать деревья, мешающие измерению осадков);

- c) проверять приборы и проводить необходимые работы по их починке и настройке;
- d) проверять журнал записей наблюдателя;
- e) инструктировать наблюдателя относительно методики проведения наблюдений и содержания аппаратуры;
- f) подчеркивать важность для наблюдателя быстро и точно заполнять и отсылать весь бланковый материал;
- g) информировать наблюдателя о всех специальных наблюдениях, которые могут понадобиться (например более частые наблюдения во время ливней и паводков).

Для эффективного выполнения пункта (e) необходимо сообщить наблюдателю о допущенных им ошибках, особенно если он делал их неоднократно. Такую информацию инспектор должен регулярно получать от лиц, отвечающих за проверку и контроль данных и обнаружение ошибок. Результаты инспекций следует заносить в журнал описания станций (раздел 21.2.2).

#### **22.1.2        *Предварительная проверка данных***

Разница между предварительной проверкой и обнаружением ошибки довольно произвольная. Процедуры, которые в одной стране считаются предварительной проверкой, в другой могут определяться как обнаружение ошибки. Кроме того, степень использования компьютера при обработке данных может изменить понятие предварительной проверки. Например, для данных, собранных вручную, а затем переведенных в машиносчитываемую форму (дискеты, магнитные ленты, листы для сканирования), термин «предварительная проверка» используется для обозначения процедур, предшествующих описанию данных в машиносчитываемой форме. Для данных, прямо собранных в цифровой машиносчитываемой форме, требуется лишь незначительная проверка перед первичной машинной обработкой, совсем иначе обстоит дело с проверкой надлежащего обозначения заполняющей среды (идентификация места сбора данных, правильные даты начала и окончания сбора данного комплекта данных, а также надлежащее обозначение типа собранных данных, как например: элементы взятых проб и частота отбора проб). В этих условиях единственным возможным способом контроля качества данных является компьютерный метод.

Для данных, собранных вручную, предварительная проверка обычно включает следующие этапы:

- a) регистрировать данные во время получения отчетных бланков;
- b) обеспечить полноту и точность информации, т. е. дат, названия станции, номера станции, если потребуется дальнейшая машинная обработка;
- c) обеспечить полноту данных;
- d) проверить правильность расчетов, выполненных наблюдателем;
- e) сравнить сообщение наблюдателя с записями данных.

Во многих странах последний пункт выполняют автоматизированным способом. Исправления следует вносить разборчиво, ручкой другого цвета, таким образом, чтобы не стереть первоначальную запись.

Данные, полученные от непрерывно-работающих самописцев, также необходимо подвергать определенному предварительному контролю. Необходимо сравнивать указанное на ленте время начала и окончания записи, а также время любых промежуточных отметок со шкалой времени на ленте, чтобы определить, нужна ли корректировка времени, и если нужна, то на сколько. Следует попробовать определить, вызвана ли необходимость коррекции остановкой часов, или ошибка накапливалась постепенно в течение записи. Кроме того, контрольные наблюдения, сделанные с помощью самописцев, также должны отмечаться на ленте, чтобы, в случае необходимости, внести исправления.

В некоторых случаях, при неавтоматизированном сборе данных, расчеты производят перед обработкой на ЭВМ. Иногда такие расчеты являются слишком сложными для наблюдателя, и тогда они должны проводиться в центральном подразделении. Примером этого является расчет испарения с озера по данным испарителя и дополнительной информации. В некоторых странах такие расчеты выполняются автоматизированно (на компьютерах или калькуляторах).

Иногда происходит потеря данных из отчетов наблюдателей. В этих случаях они могут быть восполнены методом оценки или интерполяции. Например, в сухое время года, при снижении уровня воды в реке, может быть оправдана интерполяция данных от 10 до 30 дней, если в течение этого периода времени не было значительных осадков или таяния снега. При ежедневном учете осадков можно рассчитать недостающие наблюдения за один или два дня, если после сильного дождя на близлежащих пунктах наблюдений зафиксировано примерно одинаковое их количество. Все величины, полученные при помощи интерполяции или расчетов, должны быть отмечены и в исходных записях, и в публикациях, при этом необходимо удостовериться в том, что условия позволяют выполнить достаточно точные расчеты и интерполяцию.

### 22.1.3      *Обнаружение ошибок*

Эффективность контроля качества в большой степени зависит от возможности проведения машинной проверки. Основные принципы обработки данных на ЭВМ изложены в публикации ВМО *Руководство по климатологическим практикам* [1]. Процедуры, изложенные ниже, подразумевают возможность использования машинного метода. Когда нет необходимого оборудования, обработку можно выполнять ручным способом, используя обслуживающий и технический персонал. Даже если данные, собранные вручную, обрабатываются на ЭВМ, к этому нужно подходить с чрезвычайной осторожностью, используя для этого опытных техников и специалистов.

Методика контроля качества для разных элементов отличается. В основе большинства методик контроля качества данных об осадках и температуре, собранных вручную, лежат стабилизованные ЭВМ архивы ежедневных данных по административному району или региону. Из таких архивов можно легко, на глаз, определить станции, на которых данные по температуре и осадкам постоянно регистрируются с грубыми ошибками.

Однако к изменениям в данных следует подходить с большой осторожностью. Прежде чем исправить казалось бы очевидную ошибку, необходимо изучить материалы по станции, проверить историю станции (в отношении качества ее данных) и дать оценку тем факторам, которые вызвали данное явление (чтобы убедиться, что рассматриваемые данные не являются аномальным природным явлением). Вносимое изменение должно быть закодировано, чтобы показать, что внесены изменения в ряд данных, и вся предшествующая информация должна быть проверена.

Другой метод, который может быть использован для проверки относительных отклонений наблюдаемого элемента в течение какого-то периода, заключается в использовании различных типов математических взаимосвязей (например полиномов). Рассчитанная величина сравнивается с наблюденной, и если разница между ними не превышает предварительно установленного допустимого отклонения, данные считаются правильными, а если превышает, требуется дальнейшая проверка.

Поскольку данные о стоке непрерывны во времени и коррелируются в пространстве, для надежности все наблюдения могут быть проверены путем интерполяции и статистическими методами. Проверку внутрирядной корреляции между наблюденными расходами можно проводить посредством:

- a) количественной оценки соответствия расходов на соседних станциях;
- b) качественной оценки путем сопоставления величины стока с предыдущим измерением;
- c) приблизительной проверки величины стока путем сравнения его с диапазоном предшествующих величин, характерных для данной фазы режима реки;
- d) приблизительной оценки путем сопоставления с регулярными колебаниями стока в предшествующий период.

Контроль качества первичных данных на компьютере является объективным и дает возможность тщательной проверки конкретных материалов. Поэтому такой контроль первичных данных делает ненужным другие виды контроля полученных результатов.

Следует подчеркнуть, что единственным совершенно надежным методом, который позволяет принять или отвергнуть необычные результаты, является тщательное изучение условий, при которых получены такие данные.

#### 22.1.4 *Результаты контроля качества*

С данными, собранными вручную, а затем переработанными в машиносчитываемую форму, ошибки которых выявлены во время предварительного контроля или с помощью специальной процедуры поиска ошибок, следует поступать следующим образом:

- a) исправление необходимо делать разборчиво на оригинале бланка с подписью исправляющего;
- b) машиносчитываемая форма, содержащая ошибочные данные, должна быть исправлена, следует также внести поправки во все имеющиеся копии наблюдений, а также в данные, производные от ошибочных измерений;
- c) наблюдателю следует сообщить об ошибке, а если ошибка повторяется регулярно и вызвана неисправностью приборов или нарушением методики измерения, проблему следует устранить с помощью инспектора, который должен посетить станцию (раздел 22.1.1);
- d) ошибку необходимо зафиксировать в журнале или в файле описания станции (раздел 21.2.2), чтобы на всех станциях прошла беглая проверка качества наблюдений, и чтобы инспектора были информированы относительно тех станций, где часто случаются ошибки.

Выявленные и исправленные ошибки в данных, собранных в машиносчитываемой форме, должны корректироваться в резюме, которое выдает компьютер. Первоначальную запись в машиносчитываемой форме не следует менять, а необходимо сделать специальные пометки, чтобы указать элементы, отброшенные на основе автоматического или полуавтоматического процесса редактирования. Например, для записей уровня воды, автоматически нанесенных на перфокарты с равными интервалами времени, можно использовать разницу между последовательными значениями для того, чтобы выявить величины, которые меняются больше, чем заложено в тесте. После ручной проверки этих значений часть из них будет отвергнута. В последующей операции проверяют и кодируют итоговые результаты (раздел 22.3), но первоначальные данные не изменяют. Все исправления следует задокументировать.

#### 22.2 *Методы проверки достоверности данных*

На первом этапе подробную проверку, оценку и подготовку данных выполняет наблюдатель. Это дает ему возможность улучшить уровень данных до того, как они будут направлены на машинную обработку.

Данные проверяются стандартными тестами, которые обычно включают проверку ошибок в значениях времени и измеряемой величины. Проверяется тарировка приборов идается оценка относительно согласованности и отклонений. Проводится визуальная проверка серии показаний и построенных кривых в свете ожидаемых значений, или одновременная проверка поведения регистрируемых величин, связанных между собой.

На основе этой оценки наблюдатель применяет коды качества или проверяет те, которые зафиксированы при измерении. Коды указывают на то, какого качества полученные данные, и степень достоверности выражается в виде точности данных.

На этом этапе для будущих потребителей следует приложить любые подробные материалы, подтверждающие интерпретацию данных.

### 22.2.1 *Общие методы*

С самого начала следует признать, что методы обоснования данных никогда не могут быть полностью автоматизированы, хотя некоторые переменные имеют строго ограниченные пределы надежности, которые можно проверить на компьютере. Большинство временных рядов имеют асимптотические вероятности распределения, по которым только на компьютере можно определить значение, вызывающее сомнение. Самые экстремальные значения могут оказаться правильными и очень важными при использовании гидрологических данных. Для таких величин компьютер используется только для того, чтобы принять данные или усомниться в них, но не отвергать. В случае сомнительных для компьютера значений должен использоваться анализ опытного специалиста.

Преимущество компьютерной техники заключается в ее объективности и унифицированности. Данные из различных источников подвергаются одинаковой проверке. Только с помощью компьютера можно использовать сложную алгоритмическую проверку. Эти алгоритмы могут быть сложными с математической точки зрения или по количеству и виду используемых данных. Еще одним преимуществом является ненужность утомительной дополнительной проверки данных. Компьютер позволяет специалисту определить ряд правил, при помощи которых можно установить данные, требующие более тщательной проверки.

Специальными отметками или кодами обычно четко отмечаться результаты тестирования и сомнительные величины, а также причины этих сомнений. В качестве помощи для исправления ошибок некоторые компьютерные системы выдают прогнозируемые значения. При принятии решения о необходимости применения к данной переменной сложной процедуры проверки, следует учитывать требуемую точность измерения данной переменной и возможность корректировки ошибок.

Обычно уточнение набора данных проводится одновременно с обновлением файлов базы данных, как правило: один раз в месяц, раз в полгода или раз в год.

Одним из важных организационных аспектов является возможность разделения функций по уточнению данных между полевыми центрами, оборудованными компьютерной техникой для занесения данных и центральным компьютером, который используется для обработки данных. Поскольку большинство персональных компьютеров имеет стандартное программное обеспечение для ввода и уточнения информации, то не следует затрачивать усилия на его разработку. Проверка

и контроль достоверности данных в полевых условиях могут состоять из полной проверки данных и переменных кодов и сравнительной проверки амплитуды и интенсивности изменений. Также может применяться ручная проверка таблиц и графиков исходных данных. Использование такой системы может существенно снизить количество ошибок в данных, поступающих в центр, который, в свою очередь, может уже провести более тщательную их проверку, например последовательный контроль данных по разным станциям. Еще более важное преимущество этой системы заключается в ответственности самих наблюдателей за большую часть процедуры проверки.

### 22.2.2 *Комбинированные методы*

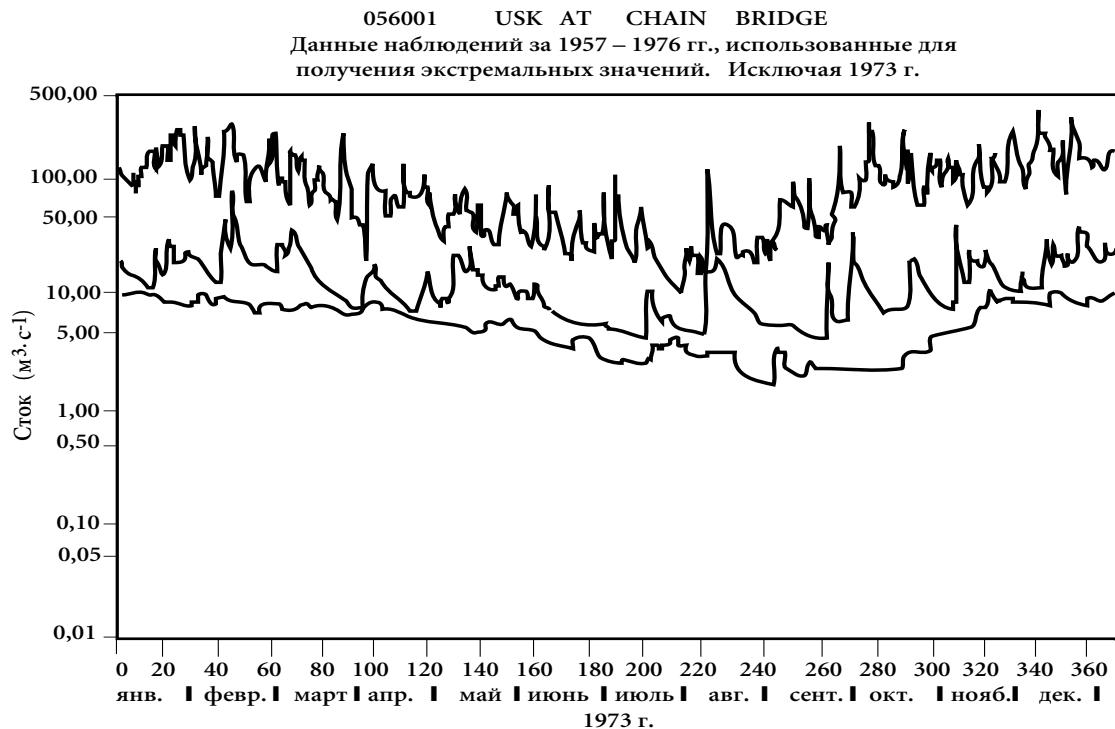
Эти методы основаны на форматировании при помощи компьютера исходных данных для того, чтобы облегчить ручную проверку. Используются два вида преобразования — итоговые таблицы и графики.

В итоговых таблицах выводятся все данные по выбранным станциям, одинаковые или взаимосвязанные переменные по соседним станциям.

Не вызывает сомнений, что визуальная проверка временных графиков является быстрым и эффективным способом обнаружения аномальных значений. Поэтому большинство систем уточнения данных включают средства для построения временных графиков опытным персоналом и выводят их на экран компьютеров, принтеров или плоттеров. Если исходные временные данные снимаются с ленты самописца, их можно сразу же сравнивать с графиком. В этом случае особенно полезно делать графики одинакового с лентой масштаба, тогда их можно при проверке накладывать друг на друга. Этот способ проверки позволяет обнаружить ошибки, допущенные при занесении данных. Метод наложения также можно использовать при сравнении данных соседних станций, что является простым, но эффективным способом контроля за согласованностью работы станций.

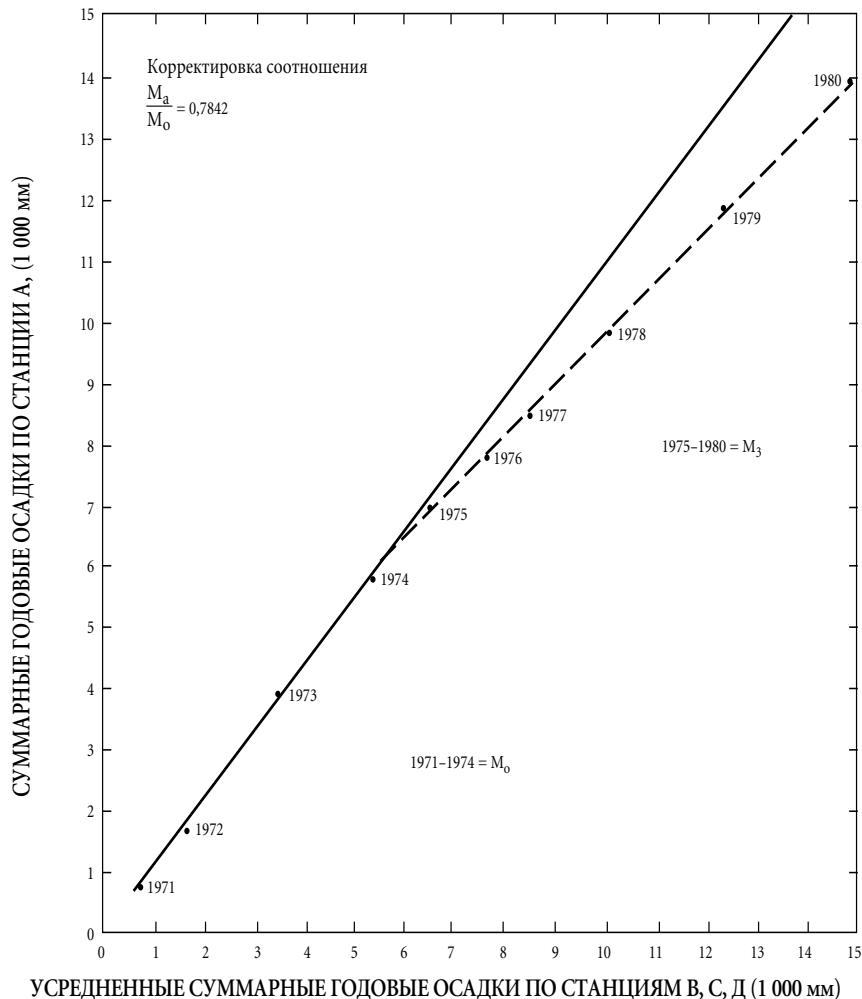
На временных графиках могут быть нанесены только кривые значений, но лучше, чтобы на них были показаны верхние и нижние границы (статистической достоверности или зарегистрированные ранее экстремальные величины), это помогло бы в общей интерпретации данных. Графики могут строиться в наблюдаемых величинах, или их можно преобразовать при помощи компьютера. Самым общим примером применения этого метода является использование логарифмических графиков речного стока и уровня подземных вод. На рисунке 22.1 показан логарифмический график ежесуточного стока и ранее зарегистрированные его максимальные и минимальные значения.

Для установления долгосрочных трендов во временных рядах по выбранным станциям рассчитываются и строятся графики связи. На рисунке 22.2 показан типичный график связи для проверки точности определения осадков за длительный период времени.



Источник: World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO- No. 634, Geneva.

Рисунок 22.1 — Логарифмический график речного стока с экстремальными значениями



Источник: World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.

Рисунок 22.2 — График двойной массы. Кривые двойной массы, показывающие связь годовых осадков по станции А со средними осадками по трем соседним станциям. Отметим, что резкие изменения произошли в 1975 году

Графики могут также строиться для проверки пространственных изменений вручную. Наиболее простой способ состоит в нанесении на график положения станций, их номеров и наблюденных значений. Этот метод широко применяется для ежемесячной и ежегодной проверки осадков и уровней подземных вод по определенной территории. При помощи более сложного программного обеспечения можно выполнять пространственную интерполяцию и строить изолинии.

Для того чтобы рассмотреть весь спектр методов по системам определения достоверности данных, полезно обратить внимание на абсолютные, относительные и физико-статистические ошибки.

Абсолютная проверка означает, что данные или кодовые значения имеют такой диапазон изменений, вероятность превышения которого равна нулю. Так, например, географические координаты станции должны находиться в пределах страны, число месяца меняться только от 1 до 31, а в цифровой системе кодирования не может существовать значения, например 43А. Данные, не прошедшие этот тест, являются неверными. Обычно очень просто определить и исправить ошибку.

Относительные проверки включают:

- a) ожидаемый диапазон изменения переменных;
- b) ожидаемую максимальную величину между двумя последовательными измерениями переменной;
- c) максимальную ожидаемую величину между значением и переменной на соседних станциях.

Понятно, что определение соответствующего диапазона изменений требует создания искусственного ряда величин. На начальных стадиях разработки базы данных рекомендуется давать широкий диапазон допустимых значений, а со временем, когда будет получено больше статистических данных по колебаниям значений конкретных переменных, их можно будет сократить.

В то время как для исторических данных требуется проведение значительного анализа, ожидаемые диапазоны для относительной проверки (метод (a)) должны рассчитываться для нескольких временных периодов, включая период проведения наблюдений. Это нужно из-за того, что при значительном увеличении временного ряда уменьшается его дисперсия. Ежедневные уровни воды, в первую очередь, сравнивают с ожидаемым диапазоном суточных величин за текущий период времени, например за текущий месяц. Но поскольку имеется вероятность того, что весь ряд значений был существенно (ошибочно) завышен или занижен, последующую проверку диапазона изменений нужно проводить за более продолжительный период времени. Таким образом, в конце каждого месяца следует сравнивать текущие среднемесячные значения со средним многолетним значением за этот месяц. Таким же образом в конце гидрологического

года текущее среднегодовое значение сравнивается со средним многолетним. Этот способ применим ко всем временным гидрологическим рядам.

Метод сравнения каждого значения с предшествующим (метод *(b)*) наиболее применим к переменным, имеющим существенную внутрирядную корреляцию, например большинство значений уровня воды. Ниже рассмотрен пример применения этого метода к значениям уровня воды. В случае очень сильной внутрирядной корреляции (например уровни подземных вод) можно выполнять сравнения за несколько периодов, как описано выше для метода *(a)*. Ежесуточные данные наблюдений подземных вод можно прежде всего сравнить с ожидаемыми изменениями за день, а общее месячное изменение — с ожидаемым месячным.

Метод *(c)* представляет собой производную от метода *(b)*, но он использует критерии ожидаемых изменений скорее в пространстве, чем во времени. Этот вид проверки наиболее эффективен для значений уровня (и расхода) в реке по одному водосбору, хотя для крупных бассейнов нужны специальные средства для накопления данных перед сравнением информации разных станций. Для других гидрологических переменных полезность этого метода зависит от плотности наблюдательной сети, относительно ее пространственной изменчивости. Примером является преобразование суммарного количества осадков в безразмерные единицы при помощи отношения наблюденных величин к некоторому среднему многолетнему значению. Это приводит к уменьшению различий, вызванных характеристиками станции.

Физико-статистическая проверка заключается в использовании регрессионной зависимости между связанными переменными для прогнозирования ожидаемых значений. Примером такой проверки может служить сравнение уровня воды с суммарным количеством осадков или сравнение величины испарения, полученной с помощью испарителя, с температурой. Такая проверка обычно выполняется с данными, полученными со станций, расположенных в районах с редкой сетью, и когда единственным средством проверки является сравнение со значениями связанных переменных, имеющих более плотную сеть. Другая категория физико-статистической проверки используется для подтверждения согласованности данных с общими физическими и химическими законами. Этот вид проверки широко применяется для данных о качестве воды.

Большинство рассмотренных относительных и физико-статистических проверок основаны на использовании временных рядов, корреляции, множественной регрессии и методик обработки поверхностных данных [2].

### 22.2.3 Специальные процедуры уточнения данных

В большинстве случаев описанные выше процедуры с большой долей вероятности позволяют выявить сомнительные данные. Однако некоторые из этих

методов были специально адаптированы и дополнены в более конкретной манере для того, чтобы соответствовать характеристикам определенного вида данных.

#### 22.2.3.1 Климатологические данные

При рассмотрении общих процедур контроля качества было отмечено, что проверка климатологических данных методом межстанционного сравнения во многих случаях весьма проблематична из-за чрезвычайно редкой сети климатологических станций. Таким образом, основными используемыми методами являются контроль диапазона и проверка согласованности между родственными переменными, наблюденными на одном участке. Например, все зарегистрированные психрометрические данные должны быть проверены или пересчитаны, чтобы убедиться, что температура сухого термометра превышает температуру смоченного и точки росы или равна им, и в зависимости от имеющихся данных необходимо рассчитать температуру точки росы и/или относительную влажность и сравнить их с полученными значениями. Таким же образом эмпирические, т. е. полученные на основании опыта соотношения между показаниями испарителя или лизиметра и другими наблюдаемыми переменными, могут помочь установить достоверность данных, вызывающих сомнения. На следующих этапах первичной обработки для оценки испарения и эвапотранспирации применяются более сложные методы.

Для всех климатологических данных необходима проверка правильности кода станции и переменных, а в некоторых сомнительных случаях, проверка тарирования и амплитуды изменений.

Детальные подробности процедуры контроля качества климатологических данных представлены в [1].

#### 22.2.3.2 Данные о количестве осадков

Поскольку количество осадков — очень важное и сильно изменчивое гидрологическое явление, существует множество дождемерных постов и, следовательно, множество данных. В большинстве стран в настоящее время существуют хорошо организованные системы по контролю качества, сбору и хранению данных об осадках. Система обработки ежесуточных данных об осадках в Метеорологическом бюро Великобритании рассмотрена в [1]. Ошибки, которые встречаются при сборе и обработке данных об осадках, почти универсальны, поэтому эта система должна служить образцом для многих стран.

Надежность системы, в которой используется сравнение данных, полученных от соседних станций, зависит от плотности сети. В районах, где дождемерные посты расположены редко, возрастаёт тенденция к использованию радиолокаторов для измерения осадков (раздел 7.6). Площадные данные, полученные с помощью радиолокаторов обеспечивают великолепную базу как для проверки достоверности

данных, так и для получения данных об осадках для районов, где отсутствуют дождемерные посты. Еще одно применение данных радиолокатора заключается в контроле данных дождемера в районах, подверженных местным осадкам большой интенсивности, например большинство тропических стран.

#### 22.2.3.3 *Данные о снеге и льде*

Тогда как водный эквивалент снега измеряется на обычных дождемерных постах, другие виды измерений снега и льда провести более трудно.

Данные о распространении снежного покрова можно проверить только в результате накопления большого объема данных полевых наблюдений, воздушной и спутниковой съемки (раздел 7.5). В настоящее время разрабатываются методы автоматизированной обработки снимков распространения снежного покрова (и даже его толщины и содержания воды в снеге). Хотя эти методы довольно перспективны, существуют проблемы в установлении различий между снежным и облачным покровом и недостаточной четкости изображений. В дальнейшем, если не будет использоваться географическая информационная система, данные о распространении снежного покрова можно хранить только для получения общего представления о водосборе и для ручной обработки.

Данные о толщине снега и запасе воды в нем требуют ручной проверки путем сопоставления данных, полученных на снегомерных маршрутах, снегомерных и обычных осадкомерных постах. Из-за больших пространственных различий в снежном покрове, трудно сравнивать данные разных станций. Однако существуют методы установления статистической надежности наблюдений на снегомерных маршрутах в условиях снеготаяния. Для корреляции широко используется понятие градусо-дня и, в тех случаях, когда талая вода составляет значительную часть речного стока, можно использовать определенное соотношение между стоком и водным эквивалентом снега. Зависимости температуры воздуха (и воды) представляют важность не только для расчета параметров градусо-дня, но также для оценки ледяного покрова и проверки данных о толщине льда, а также для прогноза дат образования и вскрытия льда.

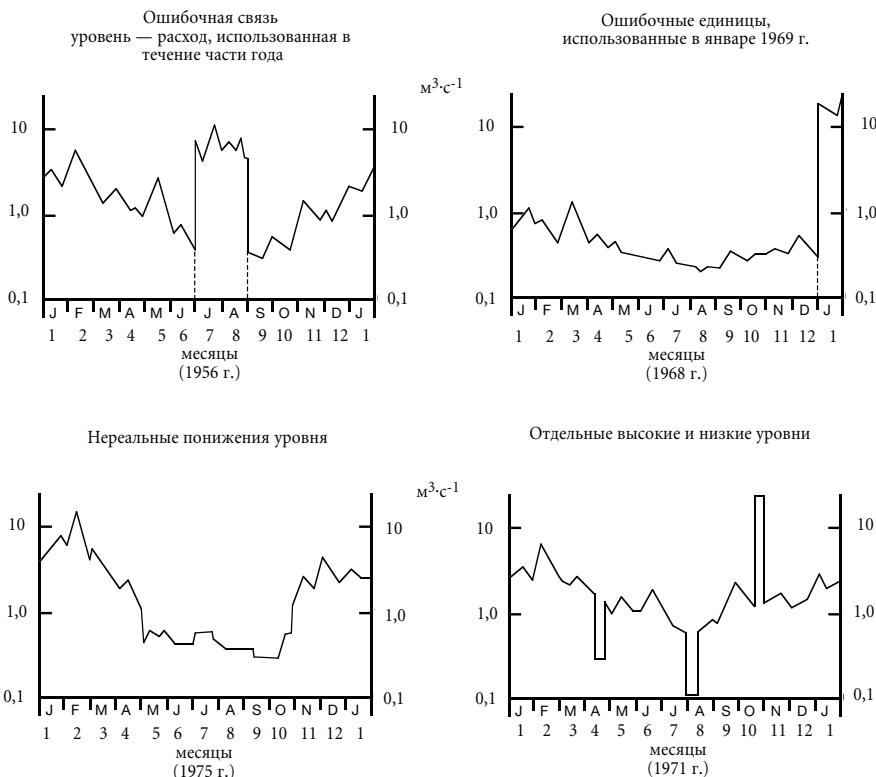
Количественные и качественные данные о снеге и льде очень важны для уточнения многих других гидрологических переменных. Например, данные об экстремальных уровнях воды в реке в течение зимних месяцев могут объясняться и исправляться на основе исторической информации о характере ледового режима.

#### 22.2.3.4 *Данные об уровне воды*

Для данных об уровне воды широко применяется составление таблиц и построение графиков, а также проверка амплитуды колебаний и интенсивности изменений, рассмотренные выше.

Обычно желательно иметь набор графиков соседней станции, но еще более важно для контроля получить колебания уровня по всем станциям данной речной системы. Представляет интерес вид графика, показанного на рисунке 22.3, на котором нанесены данные о стоке воды, но который может использоваться также для проверки данных об уровнях воды. Этот график охватывает период в 13 месяцев, и он должен выявить все несоответствия и разрывы между ежегодными данными в общей базе данных.

Когда промежуток между измерениями сравнительно короток, например на многих самописцах он составляет 15 минут, можно использовать более сложные методики. Одна из таких методик, разработанная в Институте гидрологии



*Источник:* World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.

Рисунок 22.3 — Графики временных рядов для проверки данных о речном стоке

Соединенного Королевства [3], определяет данные, считающиеся приемлемыми, и те, которые вызывают сомнение, как показано на рисунке 22.4. Так, на любом водном объекте результаты сравниваются с определенным стандартом через каждые четыре 15-минутных циклов. При появлении записи, вызывающей сомнение, она вместе со значением стандарта выносится отдельно на специальные карты для дальнейшей проверки. Для того чтобы зря не печатать сомнительные данные (например, когда цифровой самописец фиксирует малейшие колебания уровня воды), нужно установить минимальный допустимый диапазон таких отклонений. В случае, когда расхождения между последующими записями меньше этого минимума, сомнительные величины не передаются.

#### 22.2.3.5 *Данные гидрометрических станций*

Для проверки гидрометрических данных желательно на графике показывать средний уровень за время измерения и профиль поперечного сечения с глубинами. Эти данные должны быть известны и содержаться в графе описания станции. Расхождение в профиле может объясняться ошибкой наблюдателя или вызываться русловыми изменениями, которые следует проверить. На основании этих же данных можно заложить в компьютер программу оценки площади поперечного сечения для каждой вертикали.

Остальные способы проверки зависят от объема накопленной исходной информации, например, имеются базовые полевые материалы или данные о скоростях потока, рассчитанные вручную. Скорости могут быть указаны в пояснении к профилю поперечного сечения. Потребитель информации должен определить, должна ли проверка устанавливать только точность исходных данных, или она используется в системе расчетов стока. В последнем случае расчет стока обычно проводится для проверки правильности расчетов, произведенных в полевых условиях.

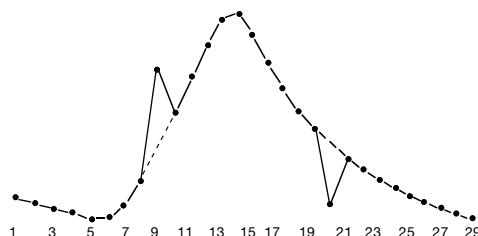
При проведении измерений для построения или проверки тарировочной кривой, рассчитанный расход должен наноситься (вручную или автоматически) на существующую тарировочную кривую, чтобы уточнить сомнительные величины или смещение тарировки в отношении доверительных интервалов измерений.

Для всех измерений программа уточнения тарировки должна проверять обоснованность использования станций, вертушек, винтов и методов анализа информации. Желательно также наносить эту информацию и соответствующие тарировочные коэффициенты на различные графики и распечатки.

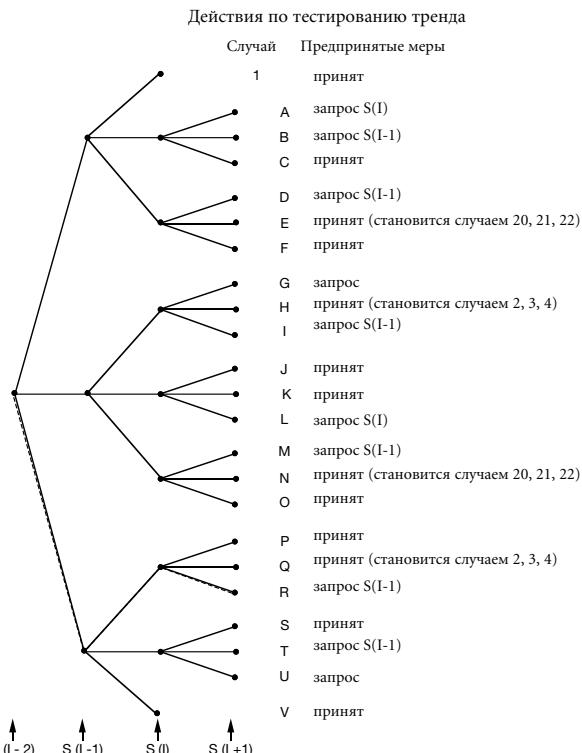
Дополнительная информация во вопросам измерения расходов воды содержится в *Manual on Stream Gauging* [4] (Наставление по измерению расхода воды).

#### 22.2.3.6 *Данные о качестве воды*

Очень широкий спектр переменных качества воды привел к принятию сравнительно простой процедуры проверки таких данных. Критерием для нее обычно служит



Точки 9 и 20 иллюстрируют нетипичные отклонения от тенденции, которые должны проверяться Программой по контролю качества



ПРИМЕЧАНИЕ. Конфигурации для проверки должны отбираться на базе известного или ожидаемого поведения уровня на отдельных станциях или группе станций.

Источник: World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.

Рисунок 22.4 — Методика определения стандарта для проверки уровня воды

абсолютная проверка анализируемых кодов, относительная проверка ожидаемого диапазона изменений и физико-химическая проверка детерминантных взаимосвязей. Если проверка диапазона выполняется при отсутствии исторических данных, следует отметить, что фактический диапазон многих переменных будет зависеть от того, для какой цели взята проба, а также от расположения точки пробоотбора.

Таблица 22.1

## Проверка соответствия физико-химическим законам данных о качестве воды

*1. Растворенные твердые вещества*

Все результаты, приведенные в  $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$ , должны соответствовать проверке:

$$0,1 \times \text{TDS} > [\text{TDS} - (\text{Na} + \text{K} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Cl} + \text{SO}_4^{2-} + 4,42\text{NO}_3^- + 0,61(\text{Alk}) + 3,29\text{NO}_2^- + \text{S}_1\text{O}_2^- + \text{F})]$$

$\text{NO}_2$ ,  $\text{S}_1\text{O}_2$  и F необязательны, т. е. они включаются в проверку только при их наличии

*2. Ионный баланс**a) Стандартные требования (от 8 до 12 ионов)*

Ионы следует преобразовать в миллиэквивалент на литр и подвергнуть проверке:

$$\left[ \frac{\text{катионы} - \text{анионы}}{\text{катионы} + \text{анионы}} \right] \times 100 < 3\%,$$

где катионы =  $\text{Na} + \text{K} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{NH}_4^+$ ,  
и анионы =  $\text{Cl} + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{PO}_4^{3-} + \text{F}$

$\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$  и F необязательны, т. е. можно проверять баланс и без них

*b) Минимальные требования (шесть ионов)*

Эта грубая проверка может использоваться, когда измерены только главные ионы

Результаты нужно преобразовать в миллиэквивалент на литр и подвергнуть проверке:

$$\left[ \frac{\text{катионы} - \text{анионы}}{\text{катионы} + \text{анионы}} \right] \times 100 < 10\%,$$

где катионы =  $\text{Na} + \text{Mg} + \text{Ca}$   
и анионы =  $\text{Cl} + \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$

*3. Проводимость*

$0,55$  проводимость ( $\text{мкС}\cdot\text{см}^{-1}$ )  $<$  TDS  $<$   $0,7$  проводимости ( $\text{мкС}\cdot\text{см}^{-1}$ ),  
где TDS = общему количеству растворенных твердых веществ

Таблица 22.1 (*продолжение*)

<i>Общая проверка качества воды</i>	
Общее количество твердых веществ	> общего количества растворенных твердых веществ
Общее количество твердых веществ	> количества частиц, способных к выпадению в осадок
200	> % насыщенности растворенным кислородом
20	> мг·л <sup>-1</sup> растворенного кислорода
БПК <sub>5</sub> (всего)	> БПК <sub>5</sub> (на фильтре)
БПК <sub>5</sub> (всего)	> БПК <sub>5</sub> (в отстой)
ХПК	> БПК
Общее количество окислов натрия	> нитратов
Общая жесткость	> временной жесткости
Общее количество цианидов	> цианидов без ферроцианидов
Общее количество фенолов	> моногидратных фенолов
Общее количество фенолов	> полигидратных фенолов
Общее количество растворенного хрома	> соединений хрома
Нефтепродукты (всего)	> свободных нефтепродуктов
Нефтяные пленки	> свободных нефтепродуктов
Всего окислов натрия	= нитраты + нитриты
Общая жесткость	= Ca + Mg
Общее количество фенолов	= моногидратные + полигидратные фенолы

Источник: World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.

Таким образом, уровень растворенных солей в пробах воды, взятых из питьевых источников, будет ниже уровня солей в пробах сточной, солоноватой и морской воды.

Очень эффективны физико-химические тесты, и поэтому они широко применяются при определении качества воды. Примеры типичных тестов для нормальных и специальных (сточные воды) проб приведены в таблице 22.1.

Если какие-либо переменные были определены в лаборатории, и информация может быть заложена в компьютер, то ее следует использовать для уточнения исходных данных. Все материалы по станциям и качеству воды, а также кодированные значения, могут быть проверены на достоверность, и, по возможности, в сочетании друг с другом.

#### 22.2.3.7     *Данные о наносах*

Как и с данными о качестве воды, при наличии достаточного количества материалов можно выполнить расчет баланса наносов. При наличии кривой интенсивности

отложений на участке измерений, отклонение значений от зависимости можно оценить по уровню статистической значимости и/или путем проверки вручную.

#### 22.2.4 *Пропуски в данных*

Значимость данных в большой степени зависит от их полноты. Время, затраченное на восстановление пропусков перед обработкой, может быть полностью восполнено после анализа и обработки конечной информации. Необходимо также, чтобы первичные расчеты были сделаны наблюдателем с учетом местных условий.

Однако часто случается, что ошибочные данные можно исправить только ценой больших затрат времени, и даже для этого необходим доступ к другим источникам информации за этот же период. В этом случае неэффективно задерживать передачу остальных данных, и следует принять решение, несет ли ответственность наблюдатель за первичную оценку пропущенных данных, или такую оценку можно выполнить более эффективно при помощи тройной обработки.

### 22.3 **Кодирование данных**

Системы кодирования информации должны быть широкими и гибкими, а персонал, занимающийся сбором данных, должен иметь полную свободу их выбора. Кроме кодирования, для осуществления руководства процессом обработки следует подготовить комментарии, которые представляют собой общее описание данных за определенный период времени и автоматически дополняют информацию, поступающую потребителям.

Главная цель, которую преследует кодирование, — сделать файлы с данными более компактными и четкими. Для разработки и использования кодов предпринимают следующие шаги:

- a) определить данные, требующие кодирования. Обычно это описательные данные, которые часто используются (например: названия местности и переменных, методы анализа, единицы измерения и показатели качества данных);
- b) решить, когда провести кодирование. Для единобразия фиксирования данных и заполнения отчетных документов, кодирование следует проводить во время сбора информации гидрологическим наблюдателем или лаборантом. Данные также могут кодироваться при занесении их в компьютер, но это менее желательно, так как замедляет процесс набивки и требует от оператора высокого профессионализма;
- c) для некоторых видов информации необходимо учитывать уже существующие системы кодов (национальные и международные). Таблицы кодов переменных и методов лабораторных анализов разработаны в нескольких странах. Выбор такой системы кодирования облегчает обмен информацией и снижает затраты на разработку новых кодовых таблиц;

- d) получить или подготовить таблицы кодов, внести коды в отчетные формы, таблицы данных и в компьютерные системы, а также включить инструкции по кодированию ( с соответствующими таблицами кодов) в папку технических инструкций;
- e) обучить наблюдателей кодированию, внимательно контролируя заполненные формы в начальный период после введения или изменения кодовой системы. Это должно выполняться в течение нескольких месяцев, чтобы техники могли хорошо изучить систему кодирования.

Большинство используемых в гидрологии кодов являются цифровыми. Однако применяются также различные сочетания цифровых и буквенных значений. Буквенные или буквенно-цифровые коды широко применяются для регистрации материалов бурения и других описательных данных, как например, классификация почвы по землепользованию. Типичное использование кодов в гидрологических системах рассмотрено ниже, а также в *NAQUADAT Dictionary of Parameter Codes* [5](Словаре параметров кодов NAQUADAT).

#### **22.3.1      Коды местоположения**

Обычно существуют кодовые значения для бассейна и бассейна притоков и их желательно внести в материалы описания станции (раздел 21.2). Это позволит быстро идентифицировать все станции (или станции, измеряющие отдельные переменные) в одном или группе бассейнов.

Дополнительная информация о цифровом обозначении станций дана в разделе 21.2.

#### **22.3.2      Коды переменных (параметров)**

Этот раздел охватывает самую большую группу кодов. Диапазон гидрологических и связанных с ними переменных, которые могут быть включены в общую базу данных, огромен. К счастью, несколько гидрологических служб подготовили и опубликовали перечень кодов переменных (Канада [5] и Департамент окружающей среды Соединенного Королевства [6]). Таблицы кодов обычно включают четыре или пять цифр для обозначения переменной, текстовое определение переменной и, возможно, некоторые сокращения или синонимы. Одним из различий в таблицах является наличие или отсутствие в кодах единиц измерения и методик анализа (особенно для лабораторных данных). Так, в одной системе код переменной 08102 означает растворенный кислород, измеренный в  $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$  с помощью устройства для измерения растворенного кислорода, тогда как в другой системе та же переменная обозначается как 0126 (растворенный кислород) с кодом для единицы измерения, равным 15, в соответствующих таблицах значения 0126 и 15 соответственно означают  $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$  и метр.

Назначение и применение таблиц кодов приводит к составлению информационных словарей. В таблице 22.2 приведена выдержка из словаря гидрологических кодов, а в таблице 22.3 из словаря кодов качества воды. В первом

Таблица 22.2  
Выдержка из словаря гидрологических кодов

<i>Коды</i>	<i>Предпочтительное название и синонимы</i>	<i>Единицы измерения</i>
DET UNIT		
2000 110	РАСХОД ВОДЫ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2001 110	ЕЖЕЧАСНЫЙ СРЕДНИЙ РАСХОД ВОДЫ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2002 110	СРЕДНЕСУТОЧНЫЙ РАСХОД ВОДЫ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2003 110	СРЕДНЕСУТОЧНЫЙ РАСХОД ВОДЫ (0000–2400)	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2004 110	СРЕДНЕМЕСЯЧНЫЙ РАСХОД ВОДЫ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2005 110	СРЕДНЕГОДОВОЙ РАСХОД ВОДЫ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2006 110	СРЕДНЕГОДОВОЙ РАСХОД ВОДЫ (окт.–сент.)	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2008 110	ЕЖЕСУТОЧНЫЙ МАКСИМАЛЬНЫЙ РАСХОД ВОДЫ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2009 110	МАКСИМАЛЬНЫЙ МЕСЯЧНЫЙ РАСХОД ВОДЫ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2010 110	МАКСИМАЛЬНЫЙ МЕСЯЧНЫЙ РАСХОД ВОДЫ ПО СРЕДНЕСУТОЧНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2011 110	МАКСИМАЛЬНЫЙ ГОДОВОЙ РАСХОД ВОДЫ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2012 110	МИНИМАЛЬНЫЙ МЕСЯЧНЫЙ РАСХОД ВОДЫ ПО СРЕДНЕСУТОЧНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
2013 21	ОБЩИЙ СТОК ЗА СУТКИ	мм
2014 21	ОБЩИЙ СТОК ЗА МЕСЯЦ	мм
2015 18	УРОВЕНЬ ВОДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО НУЛЯ ГРАФИКА (О.Н.Г.)	м
2016 18	СРЕДНЕСУТОЧНЫЙ УРОВЕНЬ ВОДЫ (О.Н.Г.)	м
2017 18	СРЕДНЕМЕСЯЧНЫЙ УРОВЕНЬ ВОДЫ (О.Н.Г.)	м
2018 18	СРЕДНЕГОДОВЫЙ УРОВЕНЬ ВОДЫ	м
2019 18	ЕЖЕСУТОЧНЫЙ МАКСИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ВОДЫ (О.Н.Г.)	м
2020 18	ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МАКСИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ВОДЫ (О.Н.Г.)	м
2021 18	ЕЖЕСУТОЧНЫЙ МИНИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ВОДЫ	м
2024 21	ЕЖЕЧАСНОЕ КОЛИЧЕСТВО ОСАДКОВ	мм

ПРИМЕЧАНИЕ. О.Н.Г. — относительно нуля графика национального водомерного поста.

случае, использованы коды отдельных переменных и блоков, а во втором — в определениях словаря используются только коды отдельных переменных. В словаре качества воды детально представлены характеристики применимости анализа к пробам подземных вод (G), озер (L) и рек (R), а также планируемая точность указанных методов анализа.

Всесторонний характер таких словарей и работа, затраченная на их подготовку, говорит о целесообразности использования уже имеющихся кодов.

Таблица 22.3

## Выдержка из словаря кодов, определяющих качество воды

Код	Определитель	Сокращения	Единицы	$G^1L^2R^3$	Показатель точности определения концентрации	Метод анализа
18130	Aldrin	Aldrin	ug/l			Газожидкостная хроматография
10101	Alkalinity total	Alk Tot	mg/l CACO <sub>3</sub>	+++	0.02	Потенциометрическое титрование
10102	Alkalinity total	Alk Tot	mg/l CACO <sub>3</sub>	+++	0.02	Колориметрическое титрование
	Anionic tensides	Tens An	MBAS	+++	0.1 mg/l Lauryl	
33103	Arsenic	AS	mg/l AS	+-+	0.005 mg/l	Колориметрия
33104	Arsenic	AS	mg/l AS	+ - +	0.005 mg/l	Беспламенная атомная абсорбция
56101	Barium	BA	mg/l BA	+ - -	0.1 mg/L	Атомная абсорбция
56102	Barium	BA	mg/l BA	+ - -	0.1 mg/l	Пламенная эмиссия
06510	Benz G.H.I., perylene 3,4 Benzofluoranthene 11,12 Benzofluoranthene 3,4 Benzopyrene	P A H	ug/l mg/l mg/l mg/l	+++		Флуоресцентная спектрофотометрия
08201	Biochemical oxygen demand	BOD	mg/l O <sub>2</sub>	- - +	2 mg/l	5 дней
05101	Boron	B	mg/l B	+ - +	0.1 mg/l	Маннитол потенциометрический метод
05102	Boron	B	mg/l B	+ - +	0.1 mg/l	Метод Куркимина
05103	Boron	B	mg/l	+ - +	0.1 mg/l	Флуориметрия
05105	Boron	B	mg/l	+ - +	0.1 mg/l	Колориметрия посредством карминовой кислоты
48101	Cadmium	CD	mg/l CD		0.001 mg/l	Атомная абсорбция
20101	Calcium	CA	mg/l CA	+++	1 mg/l	Титрование Эдта
20103	Calcium	CA	mg/l CA	+++	1 mg/l	Атомная абсорбция
20105	Calcium	CA	mg/l CA	+++	1 mg/l	Пламенная эмиссия
08301	Chemical oxygen demand	COD	mg/l O <sub>2</sub>	+++	20 mg/l	Метод K2CrO <sub>7</sub>
17201	Chloride	CL	mg/l CL	+ + +	1 ml	Титрование
17203	Chloride	CL	mg/l CL	+ + +	1 ml	Колориметрия
17205	Chloride	CL	mg/l CL	+ + +	1 ml	Особый ионный электрод
17207	Chloride	CL	mg/l CL	+ + +	1 ml	Ионный обмен
06711	Chlorophyll A	CHLORO A	mg/l	- + +	0.005 mg/l	Колориметрия
24101	Chromium hexavalent	CR HEX	mg/l CR	- - +	0.005 mg/l	Колориметрия

Таблица 22.3 (продолжение)

Код	Определитель	Сокращения	Единицы	$G^I L^2 R^3$	Показатель точности определения концентрации	Метод анализа
24002	Chromium total	CR TOT	mg/l CR	- - +	0.005 mg/l	Атомная абсорбция
29101	Copper	CU	mg/l CU	- - -	0.005 mg/l	Колориметрия
29105	Copper	CU	mg/l CU	- - +	0.005 mg/l	Экстракт растворителя атомной абсорбции
29106	Copper	CU	mg/l CU	- - +	0.005 mg/l	Аспирация прямой атомной абсорбции
06606	Cyanide	CN	mg/l CN	- - +	0.005 mg/l	Колориметрия
18010	DDD	DDD	ug/l			Газожидкостная хроматография
18020	DDE	DDE	ug/l			Газожидкостная хроматография
18000	DDT	DDT	ug/l			Газожидкостная хроматография
18150	Dieldrin	Dieldrin	ug/l			Газожидкостная хроматография
	Dissolved carbon dioxide	CO2	mg/l	+ + -	1 mg/l	
08101	Dissolved oxygen	DISS 02	mg/l O2	+ + +	0.2 mg/l	Метод Винклера
08102	Dissolved oxygen	DISS 02	mg/l O2	+ + +	0.2 mg/l	Измеритель растворенного кислорода
02041	Electrical conductivity	ELEC COND	usie/cm	+ + +	1.0 MSM at 20 Deg. C	Измеритель проводимости
36011	Faecal coliform bacteria	FAEC COL	No/100 ml	+ + +	N.A.	Комбинированная трубка
36012	Faecal coliform bacteria	FAEC COL	No/100 ml	+ + +	N.A.	Мембранный фильтр
36101	Faecal streptococci	FAE STREP	No/100 ml	+ + +	N.A.	Ферментация комбинированной трубкой
36102	Faecal streptococci	FAE STREP	No/100 ml	+ + +	N.A.	Мембранный фильтр
	Fluoranthene		mg/l			
09104	Fluoride	F	mg/l F	+ - -	0.1 mg/l	Колориметрия
09105	Fluoride	F	mg/l F	+ - -	0.1 mg/l	Особый ионный электрод
09106	Fluoride	F	mg/l F	+ - -	0.1 mg/l	Метод электронного потенциала
	Hexachloro cyclohexane isomers	BHC	ug/l			Газожидкостная хроматография
01000	Hydrogen sulphide	H2S	mg/l H2S	+ + +	0.05 mg/l	
	Indero 1,2,3-C,D pyrene		mg/l			
97167	Instantaneous discharge	INST DISCHG	m <sup>3</sup> /s	+ - +		Отметка над нулем поста
	Instantaneous discharge	INST DISCHG	m <sup>3</sup> /s	+ - +		Другие методы
26002	Iron total	FE	mg/l FE	+ + +	0.1 mg/l	Колориметрия
26004	Iron total	FE	mg/l FE	+ + +	0.1 mg/l	Атомная абсорбция — прямая
26005	Iron total	FE	mg/l FE	+ + +	0.1 mg/l	Аспирация

Таблица 22.3 (продолжение)

Код	Определитель	Сокращения	Единицы	$G^l L^2 R^3$	Показатель точности определения концентрации	Метод анализа
82101	Lead	PB	mg/l PB		0.001 mg/l	Атомная абсорбция — растворителем
82102	Lead	PB	mg/l PB		0.001 mg/l	Экстракция
03101	Lithium	LI	mg/l LI	+++	0.1 mg/l	Атомная абсорбция
12102	Magnesium	MG	mg/l MG	+++	1 mg/l	Колориметрия
12103	Magnesium	MG	mg/l MG	+++	1 mg/l	Атомная абсорбция
25101	Manganese	MN	mg/l MN	+++	0.01 mg/l	Атомная абсорбция
25104	Manganese	MN	mg/l MN	+++	0.01 mg/l	Титрование Эдта
25105	Manganese	MN	mg/l MN	+++	0.01 mg/l	Колориметрия
80111	Mercury	HG	mg/l HG		0.001 mg/l	Атомная абсорбция — прямая
28101	Nickel	NI	mg/l NI	- - +	0.005 mg/l	Аспирация
28102	Nickel	NI	mg/l NI	- - +	0.005 mg/l	Атомная абсорбция — растворителем
07506	Nitrogen ammonia	NH3	mg/l N	+++	0.1/0.01 mg/l	Экстракция
07553	Nitrogen ammonia	NH3	mg/l N	+++	0.1/0.01 mg/l	Атомная абсорбция
07554	Nitrogen ammonia	NH3	mg/l N	+++	0.1/0.01 mg/l	Атомная абсорбция — прямая аспирация
07555	Nitrogen ammonia	NH3	mg/l N	+++	0.1/0.1, 0.1 mg/l	Атомная абсорбция — растворителем
07105	Nitrogen, nitrate + nitrite	NO3NO2	mg/l N	+++	0.1/0.1 mg/l	Экстракция
	Nonionic tensides	TENS NON		- - +	0.1 mg/l Lissapol	Избирательный ионный электрод
07001	Organic nitrogen Kjeldahl	N KJEL	mg/l N	- + +	X	Титрование
07004	Organic nitrogen Kjeldahl	N KJEL	mg/l N	- + +	0.1 mg/l	Nesslerization
15254	Orthophosphate sol Reactive	PO4-P SOL	mg/l P	- + +	0.1 mg/l 0.02/0.002 mg/l	Колориметрия Колориметрия
18165	PCB's total	PCB	ug/l			
	Permanganate value	PERM V	mg/l	+ - +		Метод Kjeldahl
10302	PH	PH	pH	++ +	2 mg/l	Колориметрия
06532	Phenols	PHENOLS	mg/l	+ - +	0.1 pH units	Колориметрия
15403	Phosphorus total	P Total	mg/l P	- + +	0.002 mg/l	
	Phytoplankton genus + species	PHYTOP		- + -	N A	Газожидкостная хроматография
19103	Potassium	K	mg/l K	+ + +		Измеритель pH
19105	Potassium	K	mg/l K	+ + +	0.1 mg/l	Колориметрия
	Primary productivity	PRIM PROD	mg 02/l	- + +	0.1 mg/l	

Таблица 22.3 (*продолжение*)

<i>Код</i>	<i>Определитель</i>	<i>Сокращения</i>	<i>Единицы</i>	<i>G<sup>1</sup>L<sup>2</sup>R<sup>3</sup></i>	<i>Показатель точности определения концентрации</i>	<i>Метод анализа</i>
34102	Selenium	SE	mg/l SE	+++	A02 0,3 mg/l	
14101	Silica reactive	SI REAC	mg/l SI 02	- + -	0.001 mg/l	
11103	Sodium	NA	mg/l NA	+++	0.1/0.01 mg/l	Пламенная фотометрия
11105	Sodium	NA	mg/l NA	+++	1 mg/l	Атомная абсорбция — прямая
16301	Sulphate	SO4	mg/l SO4	+++	1 mg/l	Аспирация
16302	Sulphate	SO4	mg/l SO4	+++	2 mg/l	
16303	Sulphate	SO4	mg/l SO4	+++	2 mg/l	Баспламенна атомная абсорбция
16306	Sulphate	SO4	mg/l SO4	++ +	2 mg/l	Колориметрия
10401	Suspended solids	SUSP SOL TOT	mg/l	- - +	2 mg/l	Пламенная фотометрия
02061	Temperature	TEMP	Deg C	+++	2 mg/l	Атомная абсорбция — прямая
02062	Temperature	TEMP	Deg. C	++ +	0.5 Deg. C	Аспирация
06001	Total organic carbon	TOC	mg/l C	++ +	0.5 Deg. C	Гравиметрический метод
02076	Transparency	TRANS	metre	- + +	1 mg/l	Турбидиметрический метод
10504	Volatile suspended solids	SUSP SOL VOL	mg/l	- - +	0.5 metre	Титрование

1. Определения, выполняемые по подземным водам, помечены +.
2. Определения, выполняемые по озерным водам, помечены +.
3. Определения, выполняемые по речным водам, помечены +.

### 22.3.3 Коды квалификации данных

Принято и настоятельно рекомендуется иметь готовый набор кодов для наблюдателя-гидролога и лаборанта, которые бы помогли квалифицировать необычные и неточные данные с тем, чтобы в дальнейшем эту информацию соответственно использовать. В основном существуют две группы квалификации — первую можно рассматривать, как современное состояние (надежность) значения данных, а вторая указывает на некоторые второстепенные условия, которые могут вызвать проявления нехарактерного значения. Для обеих групп обычно используется только буквенный код, также известный как флаг. Флаги состояния данных обычно — следующие:

- Е — расчетное значение, при удовлетворительном вычислении;
- С — сомнительное значение, считается неверным, но не поддается проверке;
- Г — значение, выходящее за тарировочный диапазон и диапазон измерения (предельное значение);
- Л — значение, меньше предела фиксации (предельное значение);
- В — значение за пределами обычно принятого диапазона, но проверенное.

Могут быть следующие флаги для фоновых условий:

- I — наличие льда (затор льда);
- S — наличие снега;
- F — наличие заморозков;
- D — затопленная станция (при паводке);
- N — результаты нестандартных лабораторных проверок (контроль качества);
- P — результаты частичных лабораторных проверок качества.

Если присутствуют флаги, их следует вводить и хранить вместе с информацией, к которой они относятся. При компьютерной проверке исходных данных может появиться много флагов состояния, к которым можно применить такие же коды.

### 22.3.4 Коды пропусков в данных

Очень важно делать различие между случаем отсутствия данных и случаем данных с нулевым значением. Если оставить незаполненной графу отсутствующего значения, большинство компьютеров автоматически вставят в нее нуль, что не соответствует действительности. Поскольку при числовом кодировании недопустимы описательные характеристики, то и букву М, обозначающую отсутствие информации, сюда поставить нельзя. Единственное, что остается — это поставить код М как отдельный флаг состояния, а в системах, не использующих флаги, ставится какое-то число, бессмысленное с физической точки зрения, например 999, которое означает, что данные для обработки отсутствуют. При желании, на выходе это значение может быть перекодировано в пропуск или «—».

### 22.3.5      *Коды передачи данных*

Все системы передачи информации используют какой-либо из способов кодирования с целью обеспечения быстрой и надежной передачи информации. Если системы полностью автоматизированы, то необходимо кодировать информацию до ее обработки. Поэтому коды составляются из стандартных форм, которые позволяют передавать информацию и представлять ее в виде, пригодном для обработки. Перед обработкой обычно выполняется контроль качества. Коды передачи информации подробно рассмотрены в разделе 4.4.

### **Список литературы**

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Руководство по климатологическим практикам*. Второе издание, ВМО-№ 100, Женева.
2. World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.
3. U.K. Institute of Hydrology, 1974: *A System for Quality Control and Processing of Streamflow, Rainfall and Evaporation Data* (D. T. Pluiston and A. Hill), Report No. 15.
4. World Meteorological Organization, 1980: *Manual on Stream Gauging*. Volumes I and II, Operational Hydrology Report No. 13, WMO-No. 519, Geneva.
5. Environment Canada, 1973: *NAQUADAT Dictionary of Parameter Codes*. Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa.
6. U.K. Department of Environment, 1981: *Hydrological Determinand Dictionary*. Water Archive Manual No. 5, Water Data Unit.



## ГЛАВА 23

### ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

#### 23.1       **Общие положения**

Обработка данных придает исходной информации вид, который обеспечивает возможность ее использования и хранения в течение продолжительного времени. Обычно данные вводятся в систему путем перфорации рукописной информации, механическим аналоговым преобразованием или в виде цифр. Первичные данные обычно уплотняются и переводятся в другой, более удобный формат, они также на каждом этапе должны подвергаться проверке.

Независимо от типа обрабатываемых данных и от способа обработки, основные правила сводятся к сохранению стандарта обработки, который не будет ухудшать их качество.

Система обработки должна быть единой и периодически проверяться для поддержания ее эффективности по отношению к современным системам, технологиям и требованиям заказчика. Следует кратко отметить некоторые моменты, требующие особого внимания.

В системе не должно быть дублирования и лишней обработки; все связанные процессы необходимо эффективно координировать. Система должна предусматривать регулярный контроль на соответствующих этапах, обеспечивая легкий и быстрый доступ к информации и ее периодическое обновление через короткие интервалы времени.

Система должна быть достаточно гибкой, легко вносить исправления и дополнения или обновлять ошибочные разделы информации. В то же время, она должна быть надежной, обеспечивать высокий уровень защиты для уверенности в том, что все вносимые изменения были законны и санкционированы. Все первоначальные варианты и внесенные исправления следует хранить в архиве данных. Это позволит проконтролировать происхождение данных.

Следует очень тщательно составлять алгоритм для компьютерной упаковки данных, их расчета и проверки, поскольку это отражается на качестве архивных данных. Неточная обработка введенных в компьютер данных может ухудшить базу данных и привести к ошибкам, которые трудно сразу обнаружить. Так же и усовершенствование программного обеспечения должно помечаться и документироваться, чтобы было проще найти ошибки обработки. Подробности всей системы обработки данных приведены в таблице ниже.

## Компоненты обработки данных

В разделе Н *Справочного наставления по ГОМС* содержится описание систем первичной обработки данных разного вида, куда входят данные о климатологии, осадках, уровне воды, стоке и качестве воды.

И в заключение следует сказать о том, что вся информация должна быть застрахована на случай порчи и утери.

## 23.2        **Ввод данных**

### 23.2.1      **Ввод с клавиатуры**

Основной выбор заключается в определении систем оф-лайн и он-лайн, т. е. системы автономного режима и системы управляемого режима. Внутри этих систем выбор состоит в установлении необходимости проверки достоверности данных при их занесении в компьютер.

Система автономного режима обеспечивает введение данных с клавиатуры на компьютерный носитель, откуда они поступают на устройство ввода центрального обрабатывающего компьютера. Системы управляемого режима выдают диски, дискеты или 9-дорожечные магнитофонные ленты с информацией или подсоединенны через модем или местную сеть к главному центру обработки. В связи с задержкой информации на носителе стали все больше использовать программируемые средства регистрации, основанные на микропроцессорах. Они дают возможность проверять исходные данные по мере их поступления (т. е. ввод данных контролируется компьютером). Затем информация поступает на устройства для временного хранения, откуда может быть получена для дальнейшего редактирования. После окончания процедуры проверки наборы данных выводятся на диски, дискеты или магнитные ленты или через модемы передаются на обработку.

Основные преимущества системы автономного режима ввода данных заключаются в том, что они могут быть удалены от главного электронного обрабатывающего компьютера (EDP) и что они позволяют освободить центральную машину для решения более сложных задач по обработке данных. Рекомендуется децентрализация ввода данных, чтобы персонал, отвечающий за сбор данных, отвечал бы и за подготовку данных, включая этап начальной проверки их достоверности. Объемы данных, собираемые наблюдателями-гидрологами, не являются высокими с точки зрения их соответствия EDP, поскольку большая часть времени у наблюдателей тратится на переезды между пунктами наблюдений за сравнительно небольшим количеством информации. Настоятельно рекомендуется и считается гораздо практичеснее приобрести в полевые центры микрокомпьютеры, которые бы контролировали ввод данных, осуществляемый наблюдателями. Специальные формы для компьютерного контроля можно взять из стандартных микрокомпьютерных пакетов ввода данных или из специально разработанных пакетов программного обеспечения. При этом важно обеспечить точность и совместимость форматирования диска.

В задачи центров регистрации данных входит следующее:

- a) ввести с помощью клавиатуры данные, записанные на бланковом материале, желательно под контролем компьютера;
- b) проверить и исправить набитые данные. Это можно выполнить визуально, используя распечатки, или при помощи простых программ для проверки (раздел 22.2), разработанных в центре;
- c) сделать копию исправленных данных на диск или другой носитель компьютерной информации и отослать их в центр, или передать через модем;
- d) получить и ответить на запросы из центра, которые возникнут после более сложной проверки исходных данных на главной обрабатывающей ЭВМ. В случае необходимости, можно отредактировать исходные данные и послать новый вариант.

Если более предпочтительно использовать централизованные системы ввода данных или если имеется большое количество данных, подлежащих вводу в компьютер в центре, могут применяться более крупные системы автономного режима. На таких системах обычно работают опытные операторы, и поэтому для ввода данных могут использоваться стандартные перфокарты. Проверка данных при вводе в компьютер может вызвать задержку в реакции системы, незаметную для большинства, но снижающую скорость работы опытных операторов. Поскольку операторы обычно не имеют гидрологической подготовки, они могут не обратить внимание на предупреждения или на ошибки, возникающие в результате проверки гидрологических данных. Фактически, функции ввода данных и функции их проверки разделяются между центром подготовки данных и гидрологическим центром. Это говорит в пользу системы с распределенными функциями ввода данных, когда для операций меньшего масштаба обе функции могут быть объединены.

Диски и/или ленты, получаемые от системы автономного режима, поступают на главную обрабатывающую ЭВМ, где проходит обязательную стандартную проверку.

В системах управляемого ввода непосредственно вводят данные в главную обрабатывающую ЭВМ с терминалов. Этот вид ввода информации пригоден для небольших, обрабатывающих систем, а для более крупных систем его следует свести к минимуму, поскольку на терминалы этой системы лягут более сложные операции по обработке и проверке данных или разработке программного обеспечения. Выполнение редактирования в системе он-лайн весьма удобно, когда после проверки возникает необходимость исправить отдельные данные. Для ограниченного числа исправлений эта процедура значительно проще, чем система с автономным режимом, для которой нужно готовить новые массивы данных. Разработка мощных персональных компьютеров, которые с помощью локальной сети могли бы подключаться к главному компьютеру, значительно увеличит гибкость этих систем.

Какая бы система ввода данных не использовалась, важно чтобы были даны четкие указания по способу записи данных (желательно это делать прямо на

самом бланковом материале). Не должно быть неясностей относительно того, что следует и чего не следует заносить в компьютер, а также относительно формата различных видов данных.

### 23.2.2 *Обработка лент самописцев*

Прежде всего необходимо решить, следует ли обрабатывать ленту самописца и преобразовывать информацию в цифровой вид автоматически, или вручную снимать показания и вносить в базу данных. Если лент самописцев немного, то нет смысла их преобразовывать в цифровую форму. Но разработчики систем должны исследовать эту проблему и установить баланс между стоимостью и точностью ручных и автоматизированных способов обработки. Если имеется необходимое программное обеспечение, пригодное для компьютера, а также если система анализа лент самописца включает оборудование для преобразования в цифровую форму, то в этом случае применяют автоматизированные методы. Автоматическая обработка ленты самописца обычно выполняется при помощи цифрового преобразователя с ручным курсором для отметок на ленте самописца. По сравнению с другими устройствами цифровые преобразователи хорошего качества стоят дорого, и так же дорого может стоить программное обеспечение. Для работы с дигитайзерами (цифровыми преобразователями) требуется также более высокая квалификация персонала.

Следует отметить, что ленты с неортогональной сеткой нельзя обрабатывать с помощью программного обеспечения, которое предназначено для лент с ортогональной сеткой. Такие ленты устанавливают на некоторых устройствах, регистрирующих климатологические данные и давление воды (напор).

Более сложным является процесс оцифровки при помощи сканирующих устройств, автоматически следующих за записью на ленте. Для этого требуется сложное, дорогостоящее оборудование, которое обычно могут приобрести только руководители крупных гидрологических подразделений.

Необходимость автоматизации в большой степени определяется сложностью ленты. И если она выводится по данным об уровне подземных вод, то ручная обработка оказывается достаточно быстрой и точной. Однако при наличии множества лент с данными об осадках, ручная обработка может быть очень медленной и приводить к ошибкам. Устройства с возвратным движением пера выдают такие ленты, которые трудно интерпретировать вручную.

Независимо от применяемых методов — автоматизированных или неавтоматизированных — нужно определить способ снятия значений. Наиболее подходящим является метод снятия значений в точках перелома, между которыми значения могут линейно интерполироваться. Этот способ уменьшает трудности преобразования в цифровую форму лент самописца, особенно в случаях, когда параметры не меняются в течение продолжительного времени или изменения

очень незначительны, например данные об осадках в засушливые периоды, данные об уровне подземных вод, данные об истощении стока. Далее эту информацию можно занести в любую временную базу данных без существенной ее потери.

Для лент с данными об осадках, где линии очень динамичные, желательно снимать показания непрерывно и разработать систему программного обеспечения, чтобы отбрасывать значения, которые легко определяются с помощью интерполяции. Использование сжатия информации не должно отражаться на ее содержании, т. е. не должен наноситься ущерб ее качеству (раздел 24.2.4).

Даже на тех станциях, где установлены цифровые самописцы, многие гидрологические службы все еще пользуются ленточными самописцами, потому что лента позволяет наблюдателю сразу же визуально оценить настоящие и предшествующие условия. Если ленты используют только для контроля и дублирования, то система их обработки не нужна, поскольку исходные данные будут браться по показаниям цифровых приборов.

Цифровые преобразователи обычно используются в управляемом режиме на малых (микро/мини) системах электронной обработки данных, и информация хранится на дискетах, дисках или лентах. Когда цифровой преобразователь используется в автономном режиме, обычно под контролем специального компьютера, то на носитель компьютера заносятся либо необработанные цифровые значения, либо, при наличии системы специального программного обеспечения, заносятся исправления во времени и датах, а цифровые значения временных рядов преобразуются в нужный формат для передачи информации и затем заносятся на носитель компьютера.

Если значения с ленты снимаются вручную, то для ввода в компьютер данные необходимо перевести в удобную форму. Проще всего использовать стандартный вид временного ряда с одной переменной. Поскольку снятые с ленты данные будут, видимо, представлять собой нерегулярные временные ряды, необходимо значения времени и самих показаний заносить в форму для набивки с клавиатуры.

### **23.2.3        *Неавтоматические станции с использованием телеметрии***

На некоторых станциях наблюдения проводятся вручную, а передаются при помощи телеметрии. Такой способ полуавтоматического сбора данных часто применяется для систем обработки в реальном времени и все больше используется при обычным сборе гидрологической информации.

На самом простом уровне используют телефон, телекс или радиосвязь. Такой подход требует наличия определенных возможностей в центре по получению входной информации в пиковые режимы, а также наличия терминалов управляемого режима, через которые информация может быть вручную введена в компьютер. Точно так же необходимо разработать систему программного обеспечения для ввода данных, которая даст возможность вводить произвольные наборы единичных наблюдений с разных пунктов и обновлять отдельные файлы с

временными рядами. Процедуры ввода и обновления данных должны включать элементарный уровень проверки достоверности информации, например проверку диапазона изменений (раздел 22.2).

Если телеметрические данные используются для хранения, наблюдателю рекомендуется передавать стандартные формы данных в конце каждого отчетного периода. Пока данные не требуется вводить повторно, эту форму можно использовать для проверки цифровой записи.

Вышеописанная процедура требует вмешательства человека в начале и конце процесса телеметрической связи. В настоящее время имеются устройства, которые позволяют наблюдателю кодировать данные в нужном для компьютера формате, которые вводятся и обрабатываются в центре автоматически. Для этого метода необходимо небольшое клавишное устройство, внешне напоминающее ручной калькулятор. Наблюдатель вносит в него коды станции, параметров и наблюдаемых величин. Это устройство, которое называют терминалом для сбора и передачи данных (DCTT), кодирует данные, придавая им необходимый для передачи формат. Передача осуществляется по телефону или по радио и может использовать даже связь через спутники. Эти устройства сравнительно дешевы (включая радиопередатчики) и устраниют необходимость централизованной ручной обработки данных. Там, где имеются квалифицированные гидрологические наблюдатели, этот способ обеспечивает отличный баланс, совмещающий преимущества наблюдения за данными в режиме он-лайн (управляемом) с преимуществами автоматической передачи и обработки данных.

#### 23.2.4 *Данные автоматических станций*

Этот раздел посвящен станциям, оборудованным автоматическими датчиками, с которых данные записываются на компьютерный носитель и/или передаются телеметрическим способом в какой-либо центр сбора информации. Оба типа автоматических станций, когда данные записываются на месте и когда они передаются на расстояние, имеют много общего. Ниже кратко рассматриваются эти общие свойства прежде, чем перейти к особенностям каждого типа станций. Следует отметить, что не все гидрологические данные можно наблюдать в автоматическом режиме. Автоматические датчики разработаны для:

- a) уровня воды, температуры (воды, воздуха, почвы), осадков, влажности, систематического получения данных о: солнечной радиации, скорости ветра, направлении ветра, pH и солености;
- b) стока в открытых руслах, испарения с водной поверхности, выпадения снега, получения изменяющихся данных о: высоте снежного покрова, влажности почвы, мутности воды, растворенном кислороде, донных и взвешенных наносах, некоторых параметрах качества воды и толщине льда;
- c) не разработаны пока датчики для большинства параметров качества воды.

Из вышеперечисленного видно, что основные гидрометеорологические элементы и уровень воды хорошо фиксируются автоматическими датчиками, а сбор данных о качестве воды все еще осуществляется вручную. Однако в этой области также проводятся широкие полевые испытания.

Датчики делятся на две группы — вырабатывающие аналоговые сигналы, например поплавковые измерители уровня и радиационные термопары, и выдающие цифровое значение, например осадкомер с опрокидывающимся сосудом. Аналоговые сигналы обычно нужно преобразовывать в цифровой вид для последующих операций. Самописцы уровня воды обычно снабжены механическими/электронными преобразователями, например такими, как устройства кодирования через барабан самописца, тогда как большинство климатических датчиков используют для преобразования чисто электронные средства. Многие датчики выдают сигналы, которые для передачи на обработку требуют преобразования в стандартные единицы. Преобразование может быть общим, а может связываться с тарировочным соотношением, полученным для конкретного датчика. Данные, записанные на месте, обычно не преобразуются, это делают в центрах по обработке данных. Однако, как правило, данные преобразуют до их передачи.

Существуют две временных основы для сбора информации, первая — частота измерения, вторая — частота регистрации данных. Для некоторых систем регистрирующих датчиков, например для станции уровня с поплавковым самописцем, эти временные основы одинаковы. Однако для систем, использующих в основном электронные методы, — особенно, когда наблюдаемые явления имеют существенные изменения во времени, например скорость ветра, интервалы между измерениями могут быть очень маленькими, от 5 до 10 секунд, а усредненные суммарные данные могут регистрироваться или передаваться каждые 10 минут.

На таких станциях данные фиксируются на компьютерных носителях. Гидрологические наблюдатели посещают станции с интервалами в 1–3 месяца для сбора данных и подготовки записывающих устройств к дальнейшей работе. Данные с носителя затем передаются в центр обработки данных. Они могут быть переданы также с помощью радиосвязи, телефона или через спутник.

#### 23.2.4.1 *Бумажные ленты и кассеты для записи данных*

Характерной чертой этих видов хранения информации является необходимость перевода информации в вид, совместимый с компьютером, перед их считыванием на стандартных устройствах ввода информации.

Цифровые самописцы уровня воды старого образца были оборудованы 16-дорожечными ленточными перфораторами. Этот формат был весьма популярен, поскольку данные кодировались в десятичном формате, который наблюдатели считывали непосредственно с ленты. Для такой ленты было необходимо специальное устройство для снятия показаний в центре обработки. Подобным же образом

широко применялись записывающие устройства с кассетой пленки, особенно на автоматических станциях измерений климатических характеристик и качества воды. Непосредственный ввод данных обычно проводился с помощью приставки к микрокомпьютеру.

Причина этой явной несовместимости между цифровыми средствами записи в полевых условиях и диапазоном устройств ввода на большинстве компьютеров заключается, прежде всего, в скорости передачи. С заменой перфокарт и бумажных лент на дискеты и магнитные ленты все устройства ввода компьютера обретают более высокую скорость, следовательно, можно проводить более эффективную обработку большего объема информации. И несмотря на то что в полевых условиях еще используются 5-дорожечные и 8-дорожечные самописцы с бумажной лентой, они быстро выходят из употребления.

Большинство бумажных лент малопригодны для условий окружающей среды на гидрологических станциях, они особенно плохо переносят перепады влажности. В результате происходят небольшие, но весьма важные изменения в размерах ленты, которые впоследствии могут привести к ошибкам. Даже использование более устойчивых к влажности, покрытых пластиком лент, не устраниет эту проблему, хотя, как показывает последний опыт в Новой Зеландии, алюминиевое покрытие ленты решило эту проблему. Однако вероятность появления ошибок можно снизить в результате применения устройств для считывания информации с лент с очень малой скоростью, которые не так сильно реагируют на изменения размеров ленты.

Система работы с бумажными лентами и кассетами обычно предполагает наличие препроцессора с автономным режимом работы, т. е. небольшого устройства (возможно микрокомпьютера), задача которого заключается в переведении данных на высокоскоростной носитель, который впоследствии можно ввести в основной компьютер. Дополнительная информация по записывающим устройствам, использующим бумажные ленты и кассеты, имеется в WMO *Manual on Stream Gauging* [4] и в the *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management* [2] (Настояние по измерению расхода воды и Руководящие указания по компьютерной обработке данных в оперативной гидрологии, земельном и водном хозяйстве).

Информацию, полученную на бумажных лентах и кассетах, следует сохранять и после ее перевода на дискету или магнитную ленту. Таким образом, исходная, подробная информация не будет потеряна независимо от уровня детализации ее хранения в базе данных.

#### 23.2.4.2 Память на жестких дисках

Для записи данных всех типов непосредственно на месте измерения используются все более миниатюрные жесткие диски, связанные с микропроцессорами. Уже говорилось, что микропроцессоры используются для проверки работы датчиков и

для преобразования и накапливания полученных данных. Теперь стало возможным хранить данные в модулях обменной памяти. Типичная емкость такого модуля оперативной памяти (RAM) — 8 000 единиц информации, что соответствует примерно данным за 11 месяцев ежечасных наблюдений или почти за три месяца 15-минутных наблюдений, и их возможности все возрастают.

В начале каждого периода наблюдений в полевое записывающее устройство вставляется чистый модуль RAM. Модули периодически меняют и снятый модуль передают в центр обработки, где его вставляют вчитывающее устройство. Это устройство, имеющее собственный микропроцессор, может обрабатывать данные, содержащиеся в модуле, и придавать им нужный формат, после чего выходные данные могут быть распечатаны и/или переданы через стандартные интерфейсы (RS-232) на центральный компьютер. После передачи информация в модуле стирается, и модуль можно использовать снова. Также могут использоваться ПЗУ (постоянные записывающие устройства) для загрузки данных прямо в полевой компьютер без снятия носителя информации.

Преимущества этих систем заключаются в отсутствии движущихся механических частей в системе записи, в низком потреблении электроэнергии и в компактности. Исключительно высокий уровень автоматизации не позволяет наблюдателю непосредственно в поле визуально проверить данные, выдаваемые системой.

Этот вид записывающих полевых устройств играет все более важную роль в системах сбора и обработки информации.

### 23.3       Процедуры обработки

#### 23.3.1      Общие процедуры первичной обработки

В этой главе дано несколько искусственное отличие процедуры проверки и процедуры первичной обработки. Процесс проверки данных фактически заключается в сравнении значений теста с исходными данными. Первичная обработка рассматривается как процесс, необходимый для обработки и преобразования исходных данных в конечные результаты и для хранения.

С практической точки зрения проверка (раздел 22.2) и первичная обработка являются составными частями процедуры обновления базы данных, которая проводится ежемесячно в большинстве гидрологических систем (рисунок 24.1). Однако следует заметить, что обновление и некоторые этапы первичной обработки зависят от успешной проверки данных.

Основными компонентами первичной обработки являются:

- a) устранение известных ошибок, допущенных при вводе данных: речь идет об ошибках, которые обнаружены наблюдателями или лицами, отвечающими за контроль качества, заносимых наборов данных. Как показано на рисунке 24.1, исправление этих ошибок нужно сделать до проверки данных. Часто бывает

необходимым внести исправления также в данные, полученные с компьютерного носителя, например с бумажных лент и кассет, так как их нельзя отредактировать, пока они не внесены в компьютер. Аналогично, автоматически преобразованные в цифровую форму ленты самописца часто вводятся с известными ошибками. Самое общее устранение ошибок заключается в их компенсации на дату и разницу между зафиксированным временем и датой и временем и датой, отмеченной наблюдателем, при контрольной проверке, как описано в главе 22. Ошибки могут возникать либо в результате постепенного отклонения часового механизма в измерительных или записывающих устройствах, или вызываться дискретными явлениями, например остановкой часового механизма или перебоями в работе самописца. В первом случае, систему можно исправить при помощи линейной или более сложной интерполяции между зафиксированными значениями. В последнем — обычно возможно оценить недостающие значения вручную, при условии не слишком продолжительного перебоя в системе регистрации и при наличии достаточной фоновой информации. Исправления могут потребоваться и для компенсации более сложных явлений, например наличия льда на водомерном посту, в этом случае скорее всего исправленные значения уровня (или стока) за данный период будут рассчитаны вручную.

Сообщения об ошибках должны привести к использованию стандартных процедур и форм для ознакомления с ними персонала, занимающегося обработкой данных. Эту форму можно использовать, чтобы отметить поправки к уровню или стоку. Существенная черта процесса исправления — вручную или на компьютере — заключается в том, что все исправленные данные следует помечать флагами, чтобы показать, что все необходимые изменения сделаны;

- b) накопление и интерполяция данных: измерения многих переменных, в связи с их природной динамикой, должны проводиться в сравнительно короткий период, но будут использоваться только в виде усредненных или суммарных значений за довольно длительные периоды времени. Таким образом, для многих гидрологических задач характеристики климата могут быть нужны только в виде их суточных значений, а измерения для получения надежных среднесуточных данных следует проводить чаще. В этом смысле, хорошими примерами являются температура и скорость ветра, но во многих случаях это справедливо и в отношении данных об уровне воды и стоке. Тогда как для временных рядов с измерениями через постоянные интервалы времени объем накопленных данных постоянно увеличивается, для переменных с нерегулярными измерениями необходимо проводить сбор данных в два этапа — интерполяция/накопление.

Важно отметить, что уровни накопления информации обычно отличаются для выходных данных и данных, предназначенных для хранения. Данные с высоким уровнем агрегации, например средние величины за месяц и год, могут постоянно храниться в управляемом режиме для справочных целей. Интерполяцию и агрегацию (накопление) нужно проводить по пространству и времени. Взаимная корреляция между данными различных станций

представляет собой обычную пространственную интерполяцию, а оценка местных значений по пунктам наблюдений является обычной формой агрегации;

- c) оценка производных переменных: самые часто употребляемые производные переменные — это сток и потенциальное суммарное испарение. Но полный спектр производных переменных чрезвычайно широк и включает много показателей качества воды.

Одно из наиболее важных решений, которое принимает руководитель базы данных, состоит в том, надо ли хранить производные переменные после того, как их оценили и сообщили. Совершенно очевидно, что для данных, которые могут быть получены из основного фонда, не следует оставлять места для хранения, поскольку оно ограничено. Основанием для принятия правильного решения должны служить следующие критерии:

- i) как часто может понадобиться данная производная переменная;
- ii) насколько сложны необходимые расчеты как по используемым алгоритмам, так и по количеству необходимой информации;
- iii) каковы задачи базы данных — хранить основные данные, чтобы потребители сами обрабатывали их, или проводить учет всех важных переменных (основных и производных);

Обычно не хранят данные о расходах наносов и растворенных солей, поскольку они редко используются и их легко подсчитать путем перемножения двух основных временных рядов: стока и концентрации этих величин. В США Система хранения и исправления данных о воде (WATSTORE) [3] содержит ежедневные средние значения стока в управляемом режиме, а в Новой Зеландии Система данных временной зависимости (TIDEDA) [3] хранит только уровни в исходных форматах временных рядов, используемых для ввода. Единственное надежное правило заключается в сохранении исходных данных, независимо от дальнейшего использования, и, желательно, в автономном режиме на магнитном носителе или другим способом, но на долгий срок. Производные переменные, особенно являющиеся производными двух или более основных рядов, могут сами нуждаться в проверке достоверности. Таким образом, пока данные по уровням и по кривой скоростей могут удовлетворять любым проверочным тестам, применяемым к ним на индивидуальной основе, их комбинация для определения стока может выявить ряд несоответствий. В разделе 22.2.3.5 описаны некоторые методы проверки, особенно удобные для расчетов стока;

- d) конечные статистические результаты: это обычные выходные данные, как правило, на месячной или годовой основе, полученные в результате обработки данных в течение цикла периодического обновления информации. Эти конечные данные можно также рассматривать как результаты исправления основных данных, при этом многие элементы процесса первичной обработки и программного обеспечения для исправления и поиска данных должны носить общий характер. Учет этого приведет к значительному сокращению усилий на разработку программного обеспечения;

- e) преобразование в форматы базы данных: сложность этой операции зависит от отличия между форматом ввода данных и форматом основных файлов базы данных. Обычно в форматах ввода данные хранятся только временно, пока их не проверили и не обработали. После первичной обработки данные, качество которых проверено, записываются в файлы основной базы данных. Следует подчеркнуть, что нет необходимости и не рекомендуется использовать общие форматы. Форматы для ввода данных должны быть предназначены для удовлетворения характеристик систем сбора и ввода данных; форматы для хранения данных должны быть удобны для хранения и отвечать требованию доступности информации.

Примеры объединения данных разных форматов ввода в один вид записи и, наоборот, разделение вводимых данных для последующего хранения представлены в [2].

Кроме перегруппировки данных, могут выполняться дополнительные шаги по их кодированию, а единицы измерения могут преобразовываться в стандартные, принятые в базе данных. Преобразование нерегулярных временных рядов в регулярные (пункт (b) выше), также является одной из часто используемых операций. Существует много способов для сжатия информации, преобразующих ее в более компактный вид для хранения. Эти методы рассмотрены в разделе 24.2.4.

Не всю информацию подвергают такой обработке. Необходимость этого зависит: от конкретного гидрологического параметра, от способа регистрации и/или ввода данных, от вида обработки и от конечного назначения полученной информации. В системах реального времени существует возможность того, что поступающие в необработанном виде данные (проверенные и непроверенные) содержат все необходимое для хозяйственных и оперативных действий.

Объем необходимой обработки зависит от состояния информации и от сведений о ее достоверности, полученных на стадии проверки. Если при проверке не обнаружено явных ошибок, т. е. проверка на ошибки дает отрицательный результат (раздел 22.2), то желательно продолжить обработку, может быть, даже до этапа обновления данных. Такая методика устраниет необходимость любой дальнейшей обработки при правильности всей информации. Состояние информации отмечается в рабочих файлах, которые хранятся в ожидании редактирования (рисунок 24.1).

### 23.3.2        *Особые процедуры первичной обработки*

Рассмотренные выше общие процедуры обработки могут по-разному применяться к различным видам гидрологических данных, и необходимо установить некоторые конкретные процедуры, обычно применяемые на практике. Как отмечалось в начале этой главы, несколько публикаций ВМО и ФАО посвящены описанию этих процедур, поэтому на них часто будут даваться ссылки. В них, в основном, уделяется внимание общей теории и описанию методов, главным образом, неавтоматизированной

обработки. В настоящем разделе содержится ряд дополнительной информации, необходимой для компьютеризации и расширения знаний по таким методам.

### 23.3.2.1 Климатологические данные

[H25]

Самыми важными для применения в гидрологии климатологическими переменными являются: температура, испарение и суммарное испарение, которые перечислены в порядке повышения сложности их обработки.

Перед рассмотрением проблем обработки, полезно обратить внимание на средства, с помощью которых наблюдаются и фиксируются данные, так как это оказывает существенное влияние на последующие операции. Широкий диапазон климатологических переменных и их изменчивый характер приводят к тому, что большинство первичных данных получаются из двух источников — от постоянных климатических станций и автоматических передающих климатических станций (или станций погоды).

В первом случае, наблюдатели должны иметь хорошую подготовку и должны большую часть обработки выполнять на месте. Поскольку для большинства параметров обработка достаточно простая, можно ограничиться полевой обработкой информации. Даже при необходимости установления более сложных параметров, наблюдатели обычно могут их оценить при помощи специальных таблиц (монограмм). Таким образом, если первичная обработка выполняется на компьютере, она в большой степени включает и проверку ручных расчетов.

При использовании автоматических климатических станций применяются устройства с программным обеспечением, способным выполнять широкий объем работ по обработке данных (раздел 23.2.4). В самом деле, многие климатические станции разработаны специально для обеспечения оценок испарения и суммарного испарения, обычно на основе метода Пенмана. Большинство автоматических систем включают центральный микрокомпьютер для считывания информации с записывающих устройств — кассет или жестких дисков — и выполнения проверки, накопления и обработки информации. В этом случае главный компьютер центральной базы данных просто получает обработанные данные в формате, пригодном для хранения и использования информации. При использовании данных автоматических климатических станций следует соблюдать осторожность, поскольку диапазон точности измерения их датчиков очень непостоянен. Подробности обработки климатических данных приводятся в *Руководстве по климатологическим практикам* [1].

Существует несколько климатических переменных, которые требуют преобразования для стандартного хранения и/или использования. Например скорость ветра, измеренная на нестандартной высоте, которую может потребоваться преобразовать в стандартную скорость ветра на высоте 2-х метров, используя закон энергии скорости ветра. Подобным же образом можно откорректировать

давление, чтобы оно было приведено к среднему значению уровня моря, если такие преобразования не были выполнены перед регистрацией данных.

### 23.3.2.2 *Наблюдения за испарением и эвапотранспирацией*

[H39]

Когда используется прямой способ измерения испарения, можно использовать компьютер для установления надежности расчета испарения в результате проверки уровня воды (или веса лизиметра) при добавлении и отливании воды.

Для расчета испарения с поверхности озера по данным испарителя применяется соответствующий коэффициент испарителя. Иногда, этот коэффициент трудно определить и надо рассчитывать по специальному уравнению, включающему другие климатологические параметры, например: скорость ветра, температуру воды и воздуха и упругость водяного пара. Эти параметры могут быть представлены усредненными значениями за длительный период времени, или значениями за период измерения испарителя. Коэффициенты испарителя или алгоритмы его расчета должны даваться в файле описания станции (раздел 21.2). Если в алгоритме используются средние значения за длительный период, они также должны храниться в этом файле.

Подробности оценки испарения и эвапотранспирации рассмотрены в главах 9, 37 и 38. В подразделе 150 *Справочного наставления по ГОМС* приведены компьютерные программы для решения уравнения Пенмана.

### 23.3.2.3 *Данные об осадках*

[H26]

Данные автоматических осадкомеров часто анализируются для получения информации о характеристиках ливня, тогда как данные суммарных осадкомеров прежде всего служат для определения количества и изменения водных ресурсов.

Прежде чем анализировать показания осадкомеров, необходимо создать временные ряды с регулярными интервалами из тех нерегулярных выборок, в которые обычно записана информация. Если данные уже подверглись проверке на предварительной стадии, это преобразование формата временных рядов уже могло иметь место. Компьютерная программа для преобразования рядов должна быть достаточно гибкой, чтобы дать возможность оценивать любые временные ряды с постоянными интервалами времени, совместимые с разрешением входных данных. Для создания регулярных временных рядов программа должна уметь интерполировать и накапливать (аггрегировать) данные. Вопрос о выборе подходящего временного интервала будет рассмотрен ниже.

Независимо от того каким способом получена информация — от самописцев или суммарных осадкомеров, — в первую очередь проводится пропорциональное распределение общего количества осадков и интерполяция недостающих значений. Общее количество собранных осадков является общепринятым при ежесуточной записи показаний, например, когда осадкомер не проверялся более

недели. Этот показатель также используется и в осадкомерах с опрокидывающимся сосудом, которые передают информацию путем телеметрии. Если за период выпадения дождя не поступают данные об опрокидывании сосуда, то первое же сообщение после перерыва будет содержать информацию о количестве собранных осадков. Разница между этим количеством и предшествующими данными должна соответствующим образом распределяться на весь прошедший период.

Методы пропорционального распределения общего количества осадков и определение недостающих значений осадков фактически одинаковы. В разделе 22.2.3.2 рассмотрены методы взаимной корреляции соседних пунктов наблюдений для получения суммарного количества осадков за день и месяц. Когда ставится задача уточнить общее количество осадков, или имеются пропуски в наблюдениях, можно также использовать метод пропорционального распределения собранных осадков. Пропорционально-распределенные или рассчитанные значения осадков должны помечаться компьютерной программой, которая выполняет подобную обработку. Точно такая же методика может применяться и к данным самописцев с коротким интервалом записи, но оценки значений будут более низкого качества, так как обычно бывает значительно меньше близлежащих станций, а также из-за изменчивого характера непродолжительных дождей.

#### 23.3.2.4      *Данные о речном стоке*

[H70, H71, H73, H76, H79]

Существуют несколько этапов, необходимых для получения данных о стоке воды. На первом этапе измеряется сток, на втором — строятся кривые расхода и уровня, на третьем — описывают расчеты стока по данным уровня и на заключительном этапе выполняют стандартный анализ по рассчитанным значениям стока. Подробности методов расчета стока рассмотрены в [4].

## *Измерения стока*

Как описано в разделе 22.2.3.5, вычисление стока по данным измерений вертушкой, главным образом, выполняется для проверки величин, рассчитанных вручную в полевых условиях. Полная обработка данных измерения расхода воды методом смещения (раздел 11.4) проводится значительно реже, так как ее проводят только после лабораторного анализа. Методика анализа обоих видов измерения расхода рассмотрена в [4]. Поскольку объем данных небольшой, а анализ достаточно простой, многие системы не предусматривают компьютерной обработки этих данных. Некоторые службы выпускают небольшие портативные программирующие калькуляторы, чтобы помочь техникам рассчитать расход по данным измерения вертушкой в полевых условиях. Иногда эти данные прямо заносятся в портативный компьютер.

Поскольку данные о стоке оказывают влияние на последующие расчеты, для их проверки рекомендуется ввести их в компьютер. Компьютерная проверка может быть дополнена анализом ошибок и определением доверительных границ конкретных измерений. Рассчитанный сток можно проверить на компьютере на статистическое соответствие по кривым зависимости расхода от уровня.

Любая программа, разработанная для данных измерения стока, должна предусматривать обработку данных по максимально возможному числу вертикалей. Если практический опыт подсказывает наличие сильного отклонения промерного троса, или когда скорости не перпендикулярны гидроствору, следует внести исправления. Если программа вычисляет скорости при общем расчете стока (т. е. если в качестве исходных данных используются только основные полевые наблюдения), то она должна предусматривать доступ к справочным файлам, в которых содержатся серийные номера и тарировочные коэффициенты используемых вертушек.

Необходимо решить, каким образом должна программа рассчитывать площади сечений — на основе метода элементарных площадок или метода серединных площадок (раздел 11.2.4).

### *Кривые расхода*

Кривые расхода определяют связь между уровнем и расходом воды. Эта взаимосвязь выявляется после выполнения многочисленных измерений в большом диапазоне изменения стока, и непрерывная кривая расхода строится по значениям стока и уровня. Несмотря на то что водомерные сооружения имеют стандартное, теоретическое соотношение расхода и уровня, все же рекомендуется его получить путем практических измерений в полевых условиях.

По традиции, кривые расхода проводились на графике по точкам измерений вручную. Но во многих случаях более точно эти кривые проводятся при помощи компьютера [4]. Если необходимо, к каждому измерению можно добавить весовые характеристики, которые будут отражать субъективный или статистический уровень надежности этих данных. Однако, поскольку на некоторых створах имеется несколько положений гидравлического контроля, многие гидрологи до сих пор предпочитают считать построение кривых расхода ручной операцией. Многие факторы оказывают влияние на качество кривых расхода.

Совершенно очевидным является то, что система по обработке данных о стоке должна уметь идентифицировать и обозначить правильную кривую расхода и быть в курсе пределов ее применимости. В разделе 24.2.6 говорится об организации описания данных на станции, включая допуск для расчетных данных. Особенно следует отметить необходимость сохранности исторических данных о кривых расхода, что позволит в будущем заново рассчитать сток.

Существуют два вида форматов хранения в компьютере данных о кривых расхода — в виде функциональной зависимости и в табличной форме. До сих пор больше распространены табличные формы, когда таблица составляется вручную путем снятия значений с кривой расхода. Точки снимаются таким образом, чтобы промежуточные значения расхода можно было определить путем линейной интерполяции без существенных ошибок. Форма кривой расхода в виде функции имеет одно из трех происхождений:

- a) теоретическое (или модифицированное) уравнение для измерительного сооружения;
- b) функция, определенная компьютером по точкам измерения, т. е. автоматизация процесса ручного построения кривой расхода;
- c) функция, определенная по табличным данным, которые определялись способом, описанным в предыдущем абзаце, т. е. сглаживание кривой расхода, построенной вручную.

Там, где возможно, необходимо использовать функциональные формы, так как они не требуют много места для хранения, просты в обращении и не нуждаются в интерполяции. Если функции определены, то для построения табличной формы кривой расхода можно использовать компьютер.

#### *Расчет стока*

Для того чтобы вычислить сток, необходимо заложить в компьютер следующие данные:

- a) проверенный ряд уровней воды, т. е. уровней, исправленных по дате и времени, по высоте водомерного поста и считающихся достоверными (раздел 22.2.3.4). Если применяются методы расчета стока по площади живого сечения и уклону, то для определения уклона необходимо иметь два ряда уровней воды;
- b) кривые расходов, соответствующие времени измерения и диапазону изменения уровней. Там, где кривые расхода привязаны к часто меняющимся искусственным контрольным сечениям, например затворы и шлюзы, может понадобиться временная контрольная настройка для точного выбора компьютером кривой расхода;
- c) исправление любых изменений в данных уровня. Для этого требуется определить величину и продолжительность изменения за время измерения;

Убедившись в наличии всех необходимых данных можно выполнять расчет стока следующим образом:

- a) применить к данным уровня исправление на изменение уровня. При очень низкой величине стока, при отрицательных изменениях уровня, возможно получить конечное значение ниже нуля графика. Это обстоятельство следует отметить и о нем нужно сообщить;
- b) проверить пригодность кривой расхода для данного периода времени. Если кривая не подходит, следует установить и определить нужную кривую, а если этого не удается сделать, об этом следует сообщить;
- c) убедиться, что расчетный уровень лежит в пределах диапазона кривой расхода. Когда он выходит за эти пределы, необходимо знать, допустима ли экстраполяция кривой и если допустима, то до какого предела. Если экстраполяция не разрешена или уровень лежит вне допустимой экстраполяции, то следует сообщить об ошибке выхода за диапазон измерений;

- d) по уровню воды определить соответствующий расход по кривой расхода;
- e) вернуться к этапу (a), пока не обработаны все уровни воды;
- f) объединить временные ряды стока для определения его стандартного среднего значения (обычно за день).

Проблема, с которой часто встречаются при использовании нескольких кривых расхода, заключается в том, что при переходе с одной кривой на другую могут происходить резкие изменения стока. Эти проблемы обычно решают путем ручной подгонки стока во время переходного периода, если нельзя прерывать данные.

Следует отметить, что, в отличие от обработки данных об осадках, накопление данных для получения рядов со стандартными интервалами было последним шагом вышеперечисленных процедур. Это происходит по причине нелинейности связи между расходом и уровнем.

Как уже неоднократно отмечалось, стоковые данные обычно объединяются в среднесуточные величины. Если имеются данные об осадках, на водосборе их следует сравнить со стоковыми данными.

Независимо от определения мгновенного уровня и крайних значений стока, в конечных данных обычно не дают мгновенных величин стока. Временные ряды по уровням и соответствующим значениям стока сохраняют на ленте или дискеете вне компьютера на случай возможных запросов детальной информации.

#### *Проблемы, обычно возникающие после компьютерной обработки*

Как правило, предпринимается попытка пополнить недостающие данные путем перекрестной корреляции с близлежащими станциями, особенно находящимися в той же речной системе. При отсутствии такой возможности, можно использовать модели осадки—сток, включая использование концептуальных моделей по водосбору. Все рассчитанные данные следует соответствующим образом обозначить флагками.

Многие речные системы испытывают влияние хозяйственной деятельности человека и тенденции этих изменений со временем меняются. Для гидрологических и водно-ресурсных исследований часто необходимо попытаться отделить эти искусственные воздействия от естественной реакции водосбора, т. е. постараться получить стационарные временные ряды. Этот процесс требует большого количества дополнительной информации по всем видам прямого забора и сброса воды и регулирования стока на водосборе. Влияние водопользования можно объединить в едином временном ряду чистых изменений речного стока. Когда эти поправки вносятся в измеренные стоковые данные, получают ряд естественного стока. Все измененные данные должны соответствующим образом помечаться флагками.

Важной проблемой обработки стоковых данных является выполнение необходимых операций по сохранению и использованию этих данных. Для этого нужно решить, какие наборы данных следует сохранить. В соответствии с разделом 23.3.1,

рекомендуется сохранять только самые важные основные данные (и запасные копии) и главные производные данные, т. е. ежесуточные расходы воды, для получения которых требуется много времени. В дальнейшем работа с данными будет подробно рассмотрена в главе 24. Однако для целей руководства, необходимо отметить основные стоковые данные, которые обычно следует хранить, к ним относятся следующие данные:

- a) данные об уровнях и поправки;
- b) упорядоченные данные об уровнях, т. е. исправленные временные ряды уровней воды. Рабочую копию и, по крайней мере одну запасную, нужно сохранить (вне компьютера);
- c) кривые расходов и поправки на их отклонение;
- d) среднесуточные значения стока, некоторые из рядов можно хранить непосредственно на компьютере (данные последних лет, месячные и суммарные данные или данные за весь период для основных реперных станций);
- e) данные об использовании воды в бассейне для восстановления естественного стока.

Все остальные наборы данных являются промежуточными и могут легко определяться из этих базовых рядов.

### 23.3.2.5      Данные о качестве воды

[H05]

При первичной обработке данных о качестве воды выделяют четыре вида деятельности:

- a) проверка лабораторных значений;
- b) преобразование единиц измерения и перевод величин в стандартную контрольную шкалу;
- c) расчет показателей качества воды;
- d) расчет баланса массы.

Проверка лабораторных результатов может включать перерасчет величин, вычисленных вручную, и/или последовательную проверку разницы между величинами. Эти мероприятия существенно дополняют методику оценки достоверности данных, рассмотренную в разделе 22.2.3.6.

Для хранения в базе данных однородных значений очень важна стандартизация единиц. Эти операции обязательно включают преобразование используемых единиц измерения, например, сравнение их со стандартными единицами или приведение в соответствие с ними — значение растворенного кислорода и электропроводимости преобразуют в соответствующие величины при стандартной температуре воды, равной 20 °C.

Показатели качества воды обычно получаются из эмпирических зависимостей, которые используются для классификации и характеристики воды для тех или иных целей. Таким образом, существуют показатели годности воды для питьевых

нужд, показатели возможностей очистки, показатели токсичности, жесткости воды и т. д. В связи с тем, что эти показатели получены на базе основных комплектов данных о качестве воды, как правило, нет необходимости хранить их после передачи. По необходимости, они могут быть вновь введены в компьютер.

Некоторые показатели имеют большое значение для водного хозяйства. Например, эмпирические связи ключевых переменных очищенных сточных вод можно использовать в качестве основы для схемы платежей за очистку сточных вод. Чем выше показатель, тем выше плата.

Расчеты баланса массы проводятся, чтобы определить объем загрязнений и в качестве проверки надежности данных о качестве воды. Количество загрязняющих веществ вычисляется как произведение их концентрации и расхода воды (или объема воды для озер и водохранилищ). Путем расчета объема загрязнений в нескольких точках речной системы возможно обнаружить источники загрязнения, которые иначе трудно определить из-за изменчивости стока. Очевидно, что расчеты баланса массы нужно выполнять после вычисления стока.

Легко выполнить расчет баланса массы для консервативных компонентов, т. е. таких, которые со временем совсем не меняются или меняются очень медленно. Неконсервативные компоненты, например растворенный кислород и БПК, могут меняться исключительно быстро и необходимо применение очень сложных методов моделирования для мониторинга их поведения. Дополнительную информацию по этим вопросам можно найти в *Manual on Water Quality Monitoring — Planning and Implementation of Sampling and Field Testing* [5] (Наставление по мониторингу качества воды — планирование и осуществление отбора проб и полевого тестирования) и в *Global Environment Monitoring System (GEMS) Water Operational Guide* [6] (Оперативное руководство по Глобальной системе мониторинга окружающей среды (ГСМОС)/Воде).

### Список литературы

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Руководство по климатологическим практикам*. Второе издание, ВМО-№ 100, Женева.
2. World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.
3. World Meteorological Organization, 1981: *Case Studies of National Hydrological Data Banks (Planning, Development and Organization)*. Operational Hydrology Report No.17, WMO-No. 576, Geneva.
4. World Meteorological Organization, 1980: *Manual on Stream Gauging*. Volumes I and II, Operational Hydrology Report No. 13, WMO-No. 519, Geneva.

5. World Meteorological Organization, 1988: *Manual on Water Quality Monitoring — Planning and Implementation of Sampling and Field Testing*. Operational Hydrology Report No. 27, WMO-No. 680, Geneva.
6. United Nations Environment Programme/World Health Organization/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1992: *Global Environment Monitoring System (GEMS)/WATER Operational Guide*. Canada Centre for Inland Waters, Burlington, Ontario.

## ГЛАВА 24

# ХРАНЕНИЕ И ПОИСК ДАННЫХ

## 24.1 Архивация первичных данных

Необработанные данные — полевые книжки, ленты самописцев, графики — должны сохраняться после их обработки. Некоторые ошибки, допущенные при регистрации и обработке данных, выявляются только после того, как результаты поступают потребителям. Так же может понадобиться сверить данные с оригиналом или сделать пересчет сомнительных значений.

В отдельных случаях приходится повторять измерения, поскольку развитие и изменение технологий может потребовать обновления стандартов. Полученные данные, в любом случае, нуждаются в обработке, поэтому исходные данные обязательно должны сохраняться. Хранилище должно быть отделено от электронной базы данных и быть надежно изолированным.

Потребитель должен иметь возможность, при необходимости, получить все необработанные данные. Для этого фондовый материал для удобства пользователей может быть перенесен на микрофильмы.

## 24.2 Хранение и оперативное использование обработанной информации

### 24.2.1 Общие положения [G05, G06, G08, G10, G12]

Полное описание рекомендаций по хранению информации и составлению каталогов климатологических данных представлено в публикации ВМО *Руководство по климатологическим практикам* [1]. Для хорошо организованного хранения гидрологических данных требуется несколько иной подход, но используется также много общих процедур. К ним относятся краткое изложение отдельных положений из *Руководства по климатологическим практикам* и некоторые замечания относительно технологических новшеств, не включенные в настоящее *Руководство*, в том числе отдельные вопросы особой важности для гидрологической информации.

Большое количество накопленных во многих странах климатологических и гидрологических данных затрудняет хранение всех исходных материалов. Однако для хранения первичной информации можно делать аудиовизуальные копии, которые по сравнению с оригиналами занимают мало места, что впоследствии позволит изъять первичные материалы. Например, микрофильмы текстов и графиков занимают только 1/300 часть от их первоначального объема.

Большинство цифровой информации хранится на магнитной ленте или на диске для постоянного хранения. Зато, в этом случае на магнитной пленке длиной 2 500 футов (762 метра) при плотности записи 800 знаков на дюйм (25 мм) содержится столько же данных, сколько на 250 000 перфокарт, в результате для хранения информации потребуется лишь крошечная часть того пространства, которое использовалось раньше. Копии магнитных лент можно сделать всего за несколько минут и очень дешево. Бумажные перфоленты в последние годы все меньше применяются для постоянного хранения, и после перезаписи данных с них на магнитные ленты их можно изъять из хранилища. Микрофильмы используют также для постоянного хранения данных с внесенными исправлениями. В некоторых странах в настоящее время информацию хранят на лазерных дисках CD-ROM, на которых может содержаться большой объем легкодоступной информации.

Условия хранения этой информации на носителях любого вида должны максимально снижать их порчу в результате чрезмерного нагревания, перепада температуры, высокой влажности, пыли, уничтожения насекомыми или другими вредителями, облучения или пожара. Магнитные ленты следует оберегать от электромагнитных воздействий. Для микрофильмов необходимо использовать негорючую пленку. По мере возможности следует иметь копии записей данных: одну — в главном информационном центре, другую — в региональном центре или на станции.

Несмотря на огромные возможности микрокомпьютеров, они еще находятся на ранней стадии своего развития в отношении их возможности оперировать большими объемами данных. Поэтому рекомендуется их больше использовать на региональном уровне и для учета гидрологической информации. Однако есть смысл передать функции записи и проверки данных непосредственно на полевые компьютеры. Это рекомендуется по следующим причинам:

- a) наиболее квалифицированные сотрудники находятся в обрабатывающем центре для наиболее сложной обработки данных;
- b) это дает возможность полевому персоналу учиться работе с компьютером, что должно послужить дальнейшему развитию в использовании компьютеров в гидрологии.

Выходные данные, прошедшие начальный этап контроля качества и обработки, рассмотренный в главе 23, включают промежуточные файлы, которые используются для обновления постоянных файлов базы данных. Процедура обновления требует сокращения числа процедур и сохранения целостности данных, которые хранятся в основных файлах. Кроме того, эффективность произведенных изменений зависит от физической и логической организации файлов. В данном разделе будут рассмотрены эти вопросы, но прежде необходимо рассмотреть главный вопрос осуществления контроля за потоком информации на всех стадиях обработки данных.

#### 24.2.2 *Контроль за потоком информации*

О возможностях контроля за рядами поступающих данных уже было рассказано в связи с операцией ввода данных. Не менее важно и определение статуса всех наборов данных на разных стадиях их проверки и обновления. Это особенно справедливо, когда проверяются сомнительные данные, и пока ожидаются результаты из гидрологического центра от лиц, отвечающих за контроль качества.

Первоначально весь процесс контроля может проводиться вручную, но в дальнейшем некоторые функции могут быть автоматизированы и стать частью системы компьютерной обработки данных. Автоматизация позволяет выполнять стандартный контроль за следующими параметрами: состояние архива данных, результаты проверки, физическое размещение данных в системе, например номера лент или дисков и название наборов данных. Такой контроль очень важен, когда обрабатывается большое количество информации.

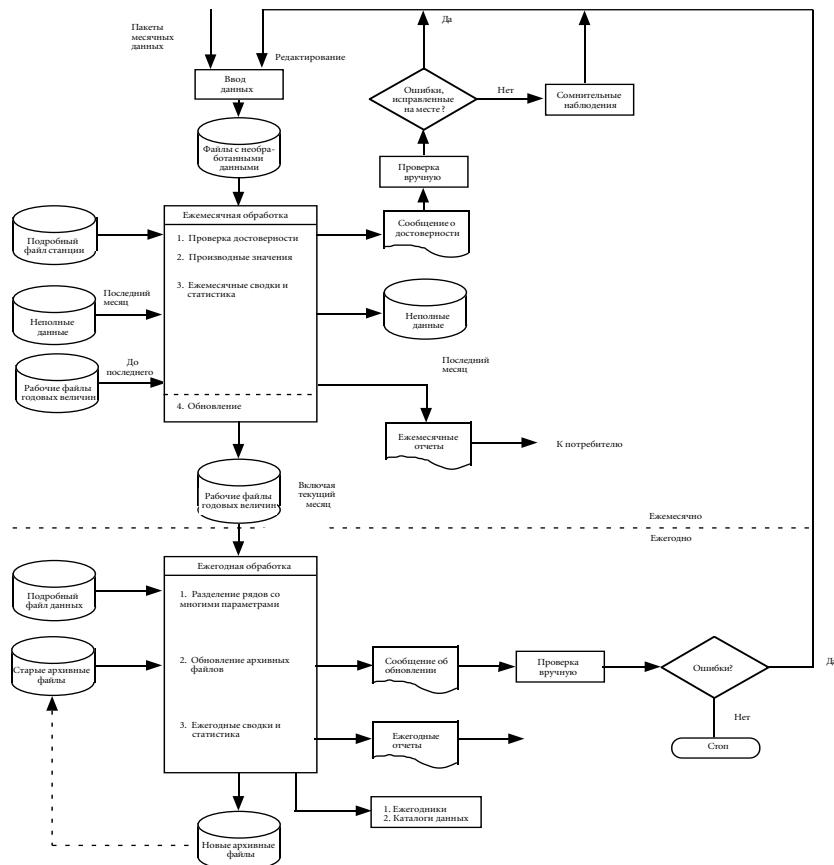
Персонал, занимающийся контролем данных, отвечает за следующие виды деятельности:

- a) регистрация поступающих данных и направление их в соответствующие системы ввода информации;
- b) контроль и фиксирование состояния входных данных, а затем их передача для первичной проверки и обработки;
- c) направление результатов проверки гидрологическому персоналу и получение отредактированных данных;
- d) повторение шагов (a) — (c) до тех пор, пока все данные не будут приняты для обновления базы данных;
- e) передача ежемесячных и ежегодных сводок соответствующим службам и лицам.

Характер решаемых задач в целом зависит от того, насколько данная информация будет доступна отдельным потребителям для редактирования. В системах управляемого режима потребители сами отвечают за контроль качества, и ответственность центра снижается. Однако в этом случае потребители должны каким-либо образом показать, что качество данных проверено и ряды готовы для дальнейшей обработки.

#### 24.2.3 *Обновление данных*

Большая часть заархивированных гидрологических баз данных обновляется по крайней мере на двух этапах. Эти этапы показаны на рисунке 24.1. Первый этап — это цикл ежемесячного обновления, соответствующий стандартному отчетному периоду. Степень деления первых четырех этапов на отдельные компьютерные процедуры зависит от потребителя и физических ресурсов системы. Если большинство файлов хранятся на ленте, то выполнить все ежемесячные процедуры, используя одну программу, просто невозможно, поскольку требуется



**ПРИМЕЧАНИЯ:**

1. Ежемесячная обработка обычно начинается спустя 10–15 дней после окончания месяца.
2. Ежегодную обработку обычно начинают спустя 30 дней после окончания года.
3. Архивные файлы могут полностью храниться в автономном режиме (на лентах или дискетах) или вперемешку в управляемом режиме (данные последних одного—двух лет) и автономном.
4. Редактирование мелкомасштабных данных можно выполнять в управляемом режиме с видеотерминала.
5. Результаты проверки достоверности и ежемесячные отчеты, показанные отдельно, могут находиться в одном документе, особенно для параметров, не требующих преобразования, например осадков.

Рисунок 24.1 — Процедура двухэтапной обработки/обновления гидрологических данных

слишком много устройств для считывания информации с ленты. Можно вообще не рассчитывать производные величины, например сток или потенциальное суммарное испарение, до тех пор пока вся базовая информация не будет проверена вручную.

Для конечного потребителя основными результатами после первого этапа обновления данных являются итоговые месячные сводки. Для управления базой данных основные результаты — это исправленные рабочие файлы с годовыми значениями. Если на первом этапе данные сводят только в месячные блоки, может понадобиться сохранить также неполные файлы данных. Это нужно при использовании данных с самописцев, совместимых с компьютером, где носители информации меняются через регулярные промежутки времени. Таким образом, при обработке месяца 1 на записывающем устройстве самописца уже могут находиться данные за несколько дней месяца 2. В этом случае данные месяца 2 хранятся во временном файле, пока не поступят дополнительные данные за этот месяц и месяц 3. Цикл повторяется и создается полный файл для данных месяца 2 и неполный для месяца 3. Эта проблема редко встречается при неавтоматизированных наблюдениях или на станциях, оборудованных системой телеметрической связи. Если совместимые с компьютером носители информации требуют предварительной обработки, существует возможность раздробления, а затем соединения данных за целый месяц при предварительной обработке на микрокомпьютере, прежде чем направить данные на центральную ЭВМ.

После проведения проверки на достоверность (раздел 22.2) и любой первичной обработки (раздел 23.3), месячные пакеты данных добавляются в файлы с текущими годовыми значениями. Данные, не прошедшие контроль качества, должны проверяться вручную, и в случае ошибки выполняют действия, указанные на рисунке 24.1.

Для того чтобы обеспечить соответствующий круговорот данных, необходимо начинать обработку данных каждого месяца не позднее 10–15 числа следующего месяца. Если обработка не начинается к этому времени, существует опасность, что вся работа с данными — ввод, обработка и обновление файлов годовых значений — окажется невыполненной.

Назначение ежегодного цикла обновления данных заключается в добавлении годовых рабочих файлов в базу данных с многолетними значениями. Этот процесс вызывает также изменение статуса данных из рабочих материалов в статус справочных гидрологических данных, прошедших контроль качества. Таким образом, необходимо обеспечить разрешение спорных вопросов до ежегодного обновления.

Конечные данные после ежегодной обработки можно использовать для гидрологических ежегодников.

#### 24.2.4 *Уплотнение и точность данных*

Важной операцией обработки данных является их уплотнение для оптимального использования места хранения. Методика уплотнения рассмотрена в работе ВМО

*Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management* [2] (Руководящие указания для компьютерной обработки данных в оперативной гидрологии, земельном и водном хозяйстве). И хотя эту методику стремятся приспособить к компьютеру, в разных системах баз гидрологических данных используются следующие методы уплотнения информации:

- a) при хранении используются целые числа, а при выводе они преобразуются в нужную шкалу. Например, осадки за сутки составляют 0,1 мм, их хранят в десятых долях мм, обозначая целым числом, а при выводе делят это число на 10. Число, которое запоминается, занимает в два раза меньше места. Обычно целое число использует 2 байта памяти по сравнению с 4-мя байтами, которые нужны для хранения истинного десятичного значения;
- b) использование неформатных (двоичных) файлов предпочтительней обычных файлов в кодах ASCII. Кроме того что бинарные (двоичные) файлы занимают меньше места, они быстрее загружаются и быстрее выводятся;
- c) использование счетчиков для повторяющихся одинаковых значений. Так, 10-дневный период без осадков не нужно записывать, как ряд из 10 нулей, а следует использовать фактор 10 повторений значений, равных нулю;
- d) более сложная версия предшествующего метода заключается в полном удалении избыточных данных. Избыточные данные образуются в результате перезаписи гидрологических явлений некоторыми типами полевых приборов, в частности самописцами с фиксированным интервалом. Например, в последовательности 40, 50, 60 совершенно ясно, что центральное значение можно получить интерполяцией соседних. Таким образом, с использованием специального программного обеспечения можно сканировать данные, удаляя все значения, которые можно получить допустимой интерполяцией. Этот метод значительно сокращает потребности в месте для хранения информации, но приводит к незначительным потерям в информативности данных. В Новой Зеландии использование системы данных, зависящих от времени (TIDEDA) (компонент ГОМС G06.2.01), дало очень большую экономию места хранения — в 2-12 раз;
- e) используют больше относительных, чем абсолютных значений данных. Например, уровень воды в скважине может даваться в абсолютных величинах, или, что является более экономичным, в величинах относительно каких-то местных отметок или относительно среднего уровня воды. Можно хранить только отклонение от предшествующего значения, тогда числа будут более маленькими и потребуется соответственно меньше места.

Необходимо сбалансировать применяемые уровни уплотнения данных. Большая эффективность хранения достигается при уплотнении данных на этапе ввода и расширении при выводе. Правильный уровень уплотнения должен отражать относительное ограничение места хранения и возможности программного обеспечения на каждой установке.

Что касается точности хранимых данных, то любая гидрологическая информация должна иметь точность до трех знаков. Поэтому во многих гидрологических базах данных, информация хранится с точностью до 3 или 4-х цифр. Таким образом, если рассчитанный сток равен  $234,56 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , его можно хранить как 235. Такая практика применяется также с целью экономии места.

#### 24.2.5 *Физическая организация файла*

Последовательная организация файла является простой и может быть использована во всех формах хранения, она годится также для временных рядов, которые чаще всего вводятся и выводятся последовательно.

Индексированные последовательные файлы очень привлекательны для хранения большинства гидрологических данных, так как характер данных сохраняется на носителе, но имеется возможность непосредственного доступа к отдельным или группам данных.

Произвольный доступ, как и последовательно-индексированный, относится только к файлам на дисках или дискетах, но требует более высокой системы организации хранения в виде томов. Отдельные данные могут иметь прямой и наиболее быстрый доступ, если они имеют произвольный доступ. Благодаря перекрестным ссылкам (указателям), данные в файлах с произвольным доступом можно использовать эффективно и разнообразно.

Если база гидрологических данных разработана и поддерживает работу с данными в управляемом режиме (интерактивном), файлы должны находиться на дисках, и тогда возможен доступ к файлам как в последовательно-индексированном, так и в произвольном режиме. В самом деле, их использование важно для получения быстрого ответа при работе с большими массивами информации.

Когда доступ к данным в управляемом режиме не является приоритетным, имеет смысл хранить ряды данных с одной переменной, например уровни воды или осадки в последовательных файлах, т. к. с них выводят временную последовательность данных. Для файлов с рядами нескольких переменных последовательно-индексированная и свободная организация доступа имеет ряд преимуществ. Если переменная измерялась только на нескольких станциях, нужно найти необходимые значения и поместить в последовательный файл. В некоторых файлах свободного доступа можно хранить указатель для каждой переменной; указатель показывает размещение данных соседней станции, которые содержат ту же переменную. В этом случае легко получить необходимые данные. Такой метод лучше всего пригоден для данных о качестве воды, где наблюдаемые переменные сильно варьируются между станциями и в разные периоды.

На магнитной ленте данные хранятся в самом обычном формате для больших баз данных — последовательном. Однако, когда файлы передаются с ленты на диски, может использоваться любой тип доступа, из рассмотренных выше. Какой

бы метод доступа не использовался рекомендуется хранить все крупные файлы базы данных неформатированными (двоичными). Некоторые системы базы данных используют набор методов для максимальной эффективности хранения и вывода данных. Это достигается путем хранения больших групп последовательных данных в единичных записях файлов со свободным или последовательно-индексированным доступом. Используя этот метод, данные ежесуточных или ежечасовых наблюдений по одной станции в течение года могут храниться в виде одной физической записи в файле свободного или последовательно-индексированного доступа. Чтобы получить данные за определенный месяц, запись по станции за конкретный год может быть выведена прямо на диск. Эта запись затем передается в буферную память, из которой можно быстро вывести данные за нужный месяц.

Следует упомянуть и применение систем управления базами данных (DBMS). Эти системы опираются на использование файлов свободного доступа [2]. Их рекомендуется использовать с осторожностью, если не известны и не зафиксированы точная дата ввода и формат вывода, и если нет достаточного программного обеспечения. Рекомендуется эволюционный подход к использованию DBMS.

В настоящее время многие службы оценивают использование родственных систем баз данных для совместного хранения данных и другой информации. Шаги в этом направлении следует строго контролировать.

#### 24.2.6 *Логическая организация файла*

Существуют два аспекта логической организации данных — крупные группировки, которые определяют количество файлов и наборы значений переменных, входящих в записи каждого файла.

Полная гидрологическая база данных будет содержать следующие группы файлов:

- a) системные справочные файлы, которые включают списки кодов (файл-словарь), используемые для проверки ввода данных, для кодирования данных и раскодирования при выводе. Если используется вид пространственного кодирования, то нужны гидрологические и/или географические справочные файлы;
- b) файлы описания станций, начиная с простых файлов, дающих номер и название станции, вид, местонахождение и оборудование, до подробных файлов, содержащих, например, полные данные о скважинах или колодцах;
- c) тарировочные файлы, содержащие подробную историческую информацию, необходимую для расчетов производных переменных, обычно на основе информации, получаемой от станции к станции. Примерами являются криевые расходов для гидрометрических станций и тарировочные коэффициенты для климатологических и фиксирующих качество воды датчиков. Некоторые данные не относятся к станциям, например тарировочные коэффициенты вертушек и справочные таблицы теоретически возможных значений солнечной радиации и времени стояния солнца;

- d) файлы временных рядов, содержащие ряды наблюдений по гидрологическим станциям. Они могут содержать ряды с одной или несколькими переменными, измеренными через регулярные и нерегулярные промежутки времени.

Связь этих разных групп файлов показана на рисунке 24.2.

С организационной точки зрения можно объединить всю информацию из пунктов (b) и (c) в общие файлы или разделить каждый вид на файлы с современной и исторической информацией. Это дает преимущество для использования стандартного формата и размера в файлах, содержащих текущую информацию. Решение в большой степени зависит от объема описательной информации, которая содержится в файлах компьютера, по сравнению с имеющейся информацией, не занесенной в компьютер.

Полезно рассмотреть другие варианты хранения временных данных различного вида в тех же физических файлах.

На самом простом уровне каждая станция имеет свои файлы, в которых данные находятся в определенной временной последовательности. Этот способ пригоден для небольших объемов данных или для хранения на ленте архивной

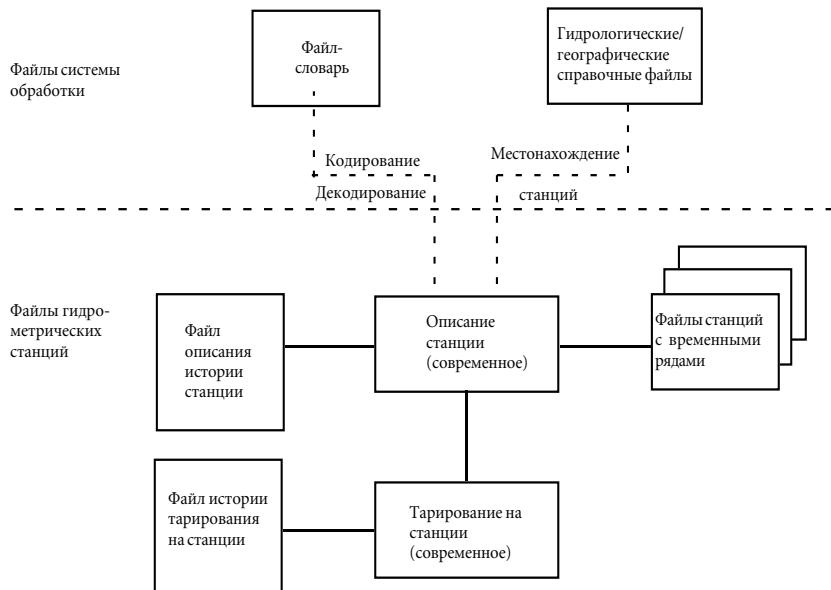


Рисунок 24.2 — Взаимосвязь между файлами гидрометрических станций

информации. Однако, поскольку гидрологическая сеть может иметь несколько тысяч станций различного типа, эта простая система представляет значительные трудности, когда приходится иметь дело с очень большим числом файлов.

На более высоком уровне, который применяется в большинстве гидрологических систем, используются файлы, которые содержат информацию по многим станциям, но каждый файл несет информацию определенного вида. Это могут быть гидрологические данные, например ежесуточные расходы, или смешанные временные ряды, например несколько переменных за определенные промежутки времени. В первом случае, файл ежесуточных значений расхода, например, будет содержать ежесуточные расходы по всей гидрологической сети. Этот файл, при последовательной организации, строится по порядку станций, а внутри каждой станции — по времени. Во втором случае, в файл включаются все ежесуточные данные независимо от вида, а файл строится по типу и номеру станции. Оба примера используются в Системе хранения и поиска данных о воде (WATSTORE) [3], в которую входят пять больших файлов. В первом файле находятся данные о главной станции (описание), три файла сгруппированы по типу гидрологической информации (качество воды, экстремальные значения стока, учет подземных вод), а последний, в котором собраны временные ряды, является файлом суточных значений. Он содержит мгновенные измерения через определенные интервалы времени, средние суточные значения и такие статистические данные, как максимальное и минимальное суточное значение. В 1981 году в этом файле находилось 190 млн суточных значений таких переменных, как расходы, уровни, наполнение водохранилищ, температура воды, удельная проводимость, концентрация наносов, расход наносов и уровень подземных вод.

На самом высоком уровне интеграции (отличном от используемого в DBMS) находятся системы, которые преобразуют все виды данных временных рядов в один общий формат и хранят все эти данные в одном физическом файле. Такой подход, используемый в Новозеландской системе TIDEDA [3], значительно упрощает разработку программного обеспечения для задач по управлению и поиску информации, потому что формат ее хранения является стандартным. Такими же системами хранения и обработки данных, являющимися также компонентами ГОМС, являются: система Соединенного Королевства HYDATA и Австралии — HYDSYS. Подробности по хранению и обработке данных в этих системах можно найти в [2].

#### 24.2.7 *Извлечение данных с одной переменной*

Иногда неудобно хранить данные в виде многочисленных временных рядов. Это связано с большим количеством переменных, которые могут наблюдаться на каждой станции, и с возможностью извлечения этих данных.

Так, например, для климатологических данных, после первичного расчета потенциального суммарного испарения, может понадобиться только поиск

отдельных переменных. Это обычно нужно для пространственной интерполяции и/или для картирования данных, например данных о температуре для расчета снеготаяния или данных о солнечной радиации для оценки потенциального урожая зерновых. В данных случаях процесс поиска будет неэффективным, поскольку придется обращаться к большому числу станций, хотя искомая переменная наблюдалась лишь на нескольких станциях.

В предыдущих разделах было показано, как такие проблемы можно преодолеть (раздел 24.2.5), используя указатели данных, которые хранятся вместе с каждым значением и указывают на местонахождение записи, содержащей искомую переменную. Однако, если эту методику использовать для многих переменных, то нагрузка на указатели становится чрезмерной.

Решение этой проблемы заключается в том, чтобы убрать важные переменные (к которым нужен частый доступ) и хранить их во временных рядах с одной переменной. Это — стандартная практика для осадков, измеренных на климатологических станциях. Такое извлечение важных переменных лучше всего выполнять при ежегодном обновлении данных, когда проверенные данные передаются в архив.

Следует подчеркнуть, что решение об извлечении одной переменной зависит от вероятности того, что данные будут найдены. Частый поиск величин для конкретных переменных подсказывает, что ее нужно отделить от наборов данных со многими переменными. Чем меньше количество станций, на которых наблюдается эта переменная, тем более неэффективно ее хранение в наборах данных со многими переменными, и тем быстрее ее нужно выделить в отдельный формат.

Если же, как обычно бывает с анализом качества воды, сразу требуется несколько переменных за один и тот же период времени, тогда первоначальный формат со многими переменными наиболее удобен.

#### 24.2.8 *Сравнение возможностей хранения данных в управляемом и автономном режимах*

Все более распространенным становится хранение данных в управляемом режиме с интерактивным доступом к данным, в результате развития технологии хранения информации на магнитных дисках и систем коммуникации. Данные всегда можно получить для просмотра, редактирования, вывода и анализа, а диапазон альтернатив по организации файлов позволяет использовать самые быстрые методы доступа к информации. Однако хранение на жестких дисках стоит дорого и затраты на них составляют большую часть стоимости компьютера и должны быть оправданы теми целями, для которых собираются и обрабатываются данные.

Гидрологические операции в реальном масштабе времени требуют использования данных в режиме прямого доступа (управляемом), поскольку требования к хранению информации обычно невысокие, их можно легко и экономично удовлетворить.

Научные системы и системы анализа имеют разные оперативные потребности, но поскольку их требования к возможностям хранения довольно скромные, обычно используют память прямого доступа, так как в этом случае доступ ко всем важным данным, как правило, является гибким и недорогим. Важное исключение из этих примеров представляют системы дистанционного измерения и системы цифровых карт, в которых для очень большого объема информации требуется использование памяти на жестком диске.

Системы гидрологического учета требуют хранения полной информации, что с технической точки зрения возможно, но сохранение информации на жестком диске неоправдано экономически, поскольку данные используются не в реальном масштабе времени, а собираются для целей планирования и проектирования. Данные могут храниться в автономном режиме (вне компьютера), что гораздо дешевле, но в случае надобности их нужно занести на жесткий диск, и это требует определенного времени. Подобная задержка обычно не имеет большого значения в кадастровых системах.

Данные в автономном режиме обычно хранятся на магнитных лентах, но могут использоваться и пригодные для обмена диски. Хранение для микрокомпьютеров в автономном режиме обычно производится на кассетах, дискетах и на стриммерах. Все больше используют лазерные диски CD-ROM в качестве автономной системы хранения информации.

Обзор многих гидрологических систем показывает, что постоянное хранение информации в управляемом режиме (на жестких дисках) предусматривается для следующих комплектов данных:

- a) пакеты последних данных, ожидающие редактирования и/или первичной обработки. Они включают рабочие файлы с месячной и годовой информацией, показанные на рисунке 24.1. Особенno удобен прямой доступ к этим данным, когда необходимо отредактировать ограниченное количество данных. Если за проверку и первичную обработку данных отвечает обрабатывающий центр, то до завершения этих работ потребитель не будет иметь доступа к данным;
- b) данные основной гидрологической базы данных за современный период. Сюда входят данные за последние 1–2–3 года, прошедшие контроль качества. Пока идет обработка новых данных, указанных в (a), более старые файлы переводятся на главную базу данных, в автономный режим (на ленту). В некоторых системах в эту группу данных входят годовые рабочие файлы за текущий год (как в пункте (a)), особенно если за их достоверность и редактирование несут ответственность сами потребители;
- c) каталог или указатель всех имеющихся данных, которые находятся в управляемом и автономном режимах: такие каталоги помогают потребителям

определить их потребности в поиске необходимых данных. Эти каталоги могут периодически публиковаться для более широкого использования. Самый простой каталог можно легко создать, выбрав нужную информацию из файлов описания станций;

- d) временные рабочие файлы, создаваемые потребителями для специального применения: эти компоненты данных обычно извлекаются из базы данных и дублируют данные, хранящиеся в другом месте. Следует отметить, что одной из главных задач DBMS является устранение такого дублирования.

Память, которую занимают перечисленные выше данные, не составляет всей памяти управляемого режима, поскольку должно оставаться место для хранения и использования программ и временных рабочих файлов потребителя. Для некоторых систем последние требования имеют очень большое значение.

В автономном режиме хранят следующие компоненты данных:

- a) копии исходных данных, введенных в систему, например 15-минутные значения уровня воды и координаты  $x, y$  из автоматической оцифровки карт осадков. В отношении этих данных необходимо принять два решения:
- i) следует ли объединять данные по коротким интервалам времени в некоторый фиксированный интервал, или их необходимо уплотнять при помощи способов, описанных в разделе 24.2.4. Обычно это объединение или уплотнение выполняют, несмотря на возможность частичной потери информации, поскольку она не имеет существенного значения при сохранении исходной информации на носителе записывающего устройства;
  - ii) нужно ли сохранять исправленные или неисправленные значения, т. е. сохранять ли копии первоначальных полевых данных или копии исправленных комплектов данных, как это применялось для целей базы данных. Обычно используется последняя альтернатива, и первоначальные полевые данные, карты (или микрофиши), перфокарты или кассеты хранятся отдельно для архивации и в справочных целях;
- b) файлы главной базы данных, за исключением файлов с данными за последний период, которые хранят в управляемом режиме. Малые и средние файлы хранятся в отдельных томах или объединяются в одном томе (многофайловый том). Очень большие файлы (например файл ежесуточных значений Геологической службы США) могут занимать несколько томов (многотомные файлы);
- c) запасные копии всех хранимых файлов (как в автономном режиме, так и в управляемом).

Расположение этих разных групп файлов сведено в диаграмму на рисунке 24.3.

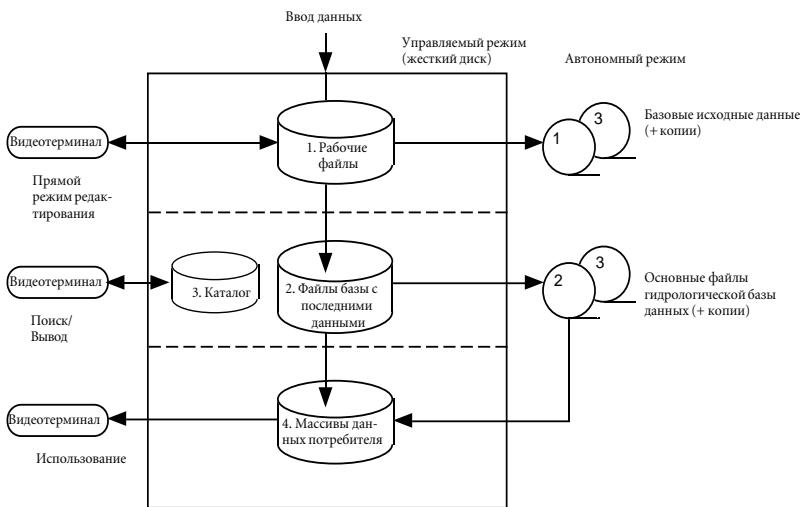


Рисунок 24.3 — Размещение данных в автономном и управляемом режимах

### 24.3 Поиск данных

Вопрос поиска данных подробно рассмотрен в [2]. Возможность быстрого нахождения необходимой информации является одним из преимуществ электронной обработки гидрологических данных. Эффективные системы поиска информации позволяют гидрологу или плановику сконцентрировать свое внимание на анализе данных, не занимаясь поиском, сортировкой и ручной обработкой данных или сводя эти работы к минимуму.

Всесторонняя система поиска данных включает следующие моменты:

- большой диапазон критерий для отбора данных: обычно такими критериями являются: переменные, бассейн, станция, период времени и величина переменной (диапазон). В частности необходимо, чтобы имелась возможность выбирать данные по любой комбинации из этих критерий;
- интерполяция/объединение(агрегация) данных по времени и пространству: пожалуй, наиболее важным из этих вариантов является преобразование нерегулярных временных рядов в регулярные путем интерполяции и преобразование временных рядов за короткие интервалы времени в суммарные или усредненные ряды с большими интервалами (т. е. превращение часовых значений в суточные или суточных в декадные). Если используется какая-либо форма географической/гидрологической справочной системы, то можно применять пространственное преобразование данных;

- c) простые статистические расчеты: должны существовать средства, которые давали бы возможность использовать простые статистические расчеты для выбранных временных периодов. Следует рассчитывать суммы (если нужно), средние, стандартные отклонения и диапазоны. Более полная статистическая обработка, которая включает взаимную корреляцию, множественную регрессию, анализ вероятностей и т. д., может предлагаться как часть стандартной системы поиска, или выбранная информация отсылается в статистические программные пакеты (или в программу пользователя), как это описывается ниже;
- d) выбор формата вывода: он должен обеспечивать прямой вывод информации в специальных форматах таблиц или графиков, а также создание файлов с данными в формате, пригодном для дальнейшей обработки. В последнем случае отобранные данные могут храниться для ввода в статистические пакеты или специальные программы потребителей. Определенный формат вывода может быть пригоден и для обмена гидрологической информацией на национальном и международном уровнях;
- e) выбор устройства для вывода информации: необходимо иметь широкую возможность выбора устройств для вывода информации. Как минимум, оно должно включать принтер, дисплей и дисковый файл. По возможности, необходимо иметь также плоттер. Данные, предназначенные для передачи на пленку или на гибкий диск, обычно прежде всего накапливаются на жестком диске и передаются вместе с отдельной программой, требующей ряд переменных, определенных потребителем.

Очень важно, чтобы найденные данные, особенно те, которые предполагается выводить в табличной форме, содержали коды и отметки в виде флагков, относящиеся к их статусу и надежности (см. раздел 22.3). Потребитель должен иметь доступ к справочной информации, касающейся общей надежности и/или ненадежности данных в течение определенных периодов, посредством файлов описания станции (раздел 21.2) или каталогов данных.

Существуют три пути поиска данных:

- a) обычная практика вывода данных: это относится к суммированию данных и подготовки статистических рядов на ежемесячной и ежегодной основе;
- b) вывод данных, определенных потребителем: после обращения к гидрологическим ежегодникам и каталогам данных, потребитель может запросить информацию, используя так называемую «про-форму», и поиск данных происходит, как при обычной работе с пакетами. Оператор делает это при помощи программного обеспечения. Форма вывода информации должна подходить для разных устройств и носителей;
- c) вывод данных с жесткого диска (в интерактивном режиме): существует несколько способов вывода данных с жесткого диска, и поскольку они широко применяются, они рассмотрены ниже.

Как уже отмечалось в этой главе и как показано на рисунке 24.3, нахождение главной базы данных на жестком диске компьютера делает возможным работу с ней в диалоговом режиме. Однако, за исключением систем с небольшим объемом информации, или при большой емкости жестких дисков компьютера, основная часть базы данных должна храниться в автономном режиме. Таким образом, режим диалога годится только для ограниченного объема информации (самой последней). В некоторых системах удаленные потребители могут направлять оператору запросы на определенную информацию, находящуюся в автономном режиме хранения. Но эти запросы удовлетворяются не сразу, и, учитывая затраты времени и стоимость пересылки информации, это может стать очень неэффективным.

Наиболее эффективным способом вывода информации с жестких дисков является двухэтапный процесс. На первом этапе диалоговая программа позволяет потребителю уточнить требования по выбору данных, а на втором — это задание выполняется автоматически в пакетном режиме, а затем выводится. Формат диалога между потребителем и компьютером называется системой меню. Получать большие выборки информации в пакетном режиме гораздо эффективнее, поскольку компьютер может распределить свои ресурсы, особенно для получения данных из томов в автономном режиме.

Все вышеизложенное, прежде всего, относится к выводу информации в управляемом режиме из кадастровой гидрологической системы. Однако более фундаментальным требованием является возможность просмотра собранной и хранимой информации в системах реального времени. Варианты поиска могут включать как телеметрические запросы к отдельной или нескольким станциям, так и построение графиков и просмотра на дисплее недавно собранной информации или последних прогнозов в обрабатывающем центре.

### Список литературы

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Руководство по климатологическим практикам*. Второе издание, ВМО-№ 100, Женева.
2. World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.
3. World Meteorological Organization, 1981: *Case Studies of National Hydrological Data Banks (Planning, Development and Organization)*. Operational Hydrology Report No. 17, WMO-No. 576, Geneva.

## ГЛАВА 25

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДАННЫХ

#### 25.1       **Общие положения**

При обращении в гидрологическую базу данных можно сделать запрос о данных различного формата и на разных носителях (раздел 24.3). Большинство запросов требует обращения к соответствующим программам. Форматы, выбранные для этих программ, должны учитывать запросы потребителей и отвечать наиболее общим требованиям.

Основная цель системы хранения и поиска информации заключается в обеспечении ее широкого применения. Особое внимание следует обратить на простоту доступа к информации и быстроту ее получения. Поэтому потребитель должен иметь прямой доступ к информации, а процесс ее получения должен быть хорошо объяснен и проходить легко и просто. Стандартные форматы вывода должны регулярно публиковаться, чтобы потенциальные потребители могли реально оценить свои потребности. Это дает и практические результаты: неподготовленные клиенты теряют время и деньги.

Одной из наиболее важных особенностей информации является точное описание степени достоверности данных (раздел 22.3). Сборщики данных обращают особое внимание на точность регистрации и документирования информации, помня, что все данные в итоге идут к потребителю. Все конечные данные должны быть промаркированы по качеству и снабжены пояснениями. Потребители должны знать, что более детальная информация может находиться в исходных данных (раздел 21.2).

Помимо обеспечения выдачи информации по запросам, необходимо периодически публиковать материалы по обновлению данных. Это обычно делается в стандартных форматах вывода данных. Итоговые публикации могут быть в виде книг, микрофильмов или в компьютерной форме, например диск или CD-ROM.

Распространение обработанной информации позволяет иметь обратную связь с потребителями информации. Когда сборщики информации знают нужды потребителей, они могут пересмотреть свои методы и частоту наблюдений, по-новому оценить качество данных, искать ошибки при обработке и развивать свои знания в отношении обслуживаемых станций.

## 25.2 Каталоги информации

Каталог должен помочь потребителю найти гидрологические данные, пригодные для их практической деятельности. С этой целью информация собирается по каждой гидрологической станции, а в отношении речной станции — также и по соответствующему водосбору (относится к измеряемому водосбору).

В информацию по каждому измеряемому водосбору следует включать:

- a) детали водосбора, например: размер, геоморфологию, рельеф, растительность, землепользование;
- b) климатическую зону и средние годовые значения осадков и испарения на данном водосборе;
- c) расположение, тип и качество водомерной станции;
- d) детали по любому регулированию стока выше станции или другие факторы, которые могут усложнить использование данных наблюдений;
- e) период, полнота и качество данных по расходам и качеству воды (включая перенос наносов);
- f) расположение метеорологических станций на водосборе или около него и период их действия.

Эта информация сгруппирована и рассматривается под тремя названиями: описательная информация, карта водосбора и имеющиеся данные.

Для того чтобы помочь потребителям определить отвечающие их целям измеряемые водосборы, им следует предоставить описание характеристик каждого бассейна и основных свойств измерительных устройств, а также необходимо показать степень надежности и качества стоковых данных.

Предложенные названия и соответствующая информация представлена в таблице 25.1. На практике не все подробности по каждому измеряемому водосбору можно найти под этими названиями, но предлагается, чтобы везде сохранялся одинаковый формат. Пример, дополняющий таблицу 25.1, приводится на рисунке 25.1.

Важно иметь карту для каждого водосбора или группы водосборов. Карта должна иметь масштаб, удобный для нанесения информации. Для водосборов разного размера могут применяться карты разного масштаба. В ближайшем будущем информация для составления карт будет храниться непосредственно в компьютере при помощи географических информационных систем (раздел 40.7) для того, чтобы ее легче было просмотреть в различных масштабах. Информация, которую следует наносить на карту, приводится в таблице 25.2, а основной пример показан на рисунке 25.2.

Страница, характеризующая имеющиеся данные, должна быть выполнена в виде короткого оглавления по проверенным и исправленным данным о месячных осадках и стоке, а также годовым данным о качестве воды.

Таблица 25.1  
Пример формата каталога данных

<i>Идентификация</i>	
Название:	Название реки, станции и номер станции
Речной бассейн:	Название и номер бассейна
Расположение:	Расположение гидрометрической станции по широте, долготе и местная координатная сетка
<i>Детали водосбора</i>	
Площадь водосбора:	Площадь водосбора в квадратных километрах
Климатическая зона:	Климат всего водосбора, выраженный в биоклиматических зонах, отражающих количество и распространение осадков
Среднее количество осадков:	Оценка среднегодового количества осадков, отнесенного к центру водосбора, а для больших водосборов — диапазон изменения годовых осадков по всему водосбору. Необходимо указать источник информации
Испарение с водной поверхности:	Оценка среднегодовой величины испарения по данным испарителя, отнесенной к центру водосбора. Необходимо указать источник информации
Геоморфология:	Описание рельефа, земной поверхности и геологического строения водосбора
Формы рельефа:	Количественная оценка соотношения основных форм рельефа в пределах водосбора
Естественная растительность:	Описание естественной растительности, полученное по данным аэрофотосъемки
Земли без растительности:	Соотношение естественных пустых земель и окультуренных. Необходимо указать источник и дату получения данных о такой оценке
Современная растительность:	Описание современного растительного покрова в водосборном бассейне по данным справочных источников
Землепользование:	Справки по землепользованию. Необходимо дать точный источник информации: полевые наблюдения, карта сельскохозяйственного землепользования или более подробные оценки
Регулирование:	Справки по разработкам выше гидрометрического створа, которые могут повлиять на режим стока. Должны быть перечислены возможные источники подробной информации
Общие замечания:	Там, где на станции не измеряется общий сток с водосбора, или его значение нерепрезентативно из-за регулирования выше гидроствора, приводятся характеристики водосбора, а лишь комментарии к специальным функциям и назначению гидрометрической станции

Таблица 25.1 (*продолжение*)

<i>Детали описания гидрометрической станции</i>	
Период действия:	Месяц и год открытия и закрытия гидрометрической станции. В случае, когда на одном участке реки работают несколько гидрометрических станций, необходимо указать соответствующую справочную информацию
Классификация:	Классификация станции в системе гидрологической сети (т. е. специализированная или базовая станция)
Оборудование станции:	Описание приборов по измерению и регистрации уровня воды. Замена любых устройств должна фиксироваться
Запись уровня:	Среднегодовой процент зафиксированных данных и процентное выражение тех данных, которые необходимо интерпретировать при обработке (ошибочные данные)
Кривая расхода:	Краткие комментарии относительно метода построения и качества связи между расходом и уровнем, а также максимальный измеренный расход. По возможности, следует показать соотношение между измеренным и максимальным стоком
Степень чувствительности:	Следует дать какую-либо характеристику чувствительности кривой расхода. Наиболее предпочтительным способом определения характеристики чувствительности является процент от объема стока, который может быть определен с точностью до 1–2–5 % при ошибке в регистрации уровня на 1 мм. Отметим, что эта характеристика зависит от наклона кривой расхода и от кривой продолжительности стока. В других случаях чувствительность может определяться с учетом ошибки в уровне на 10 или 100 мм

Для водосборов с большим числом осадкомерных станций непрактично делать отдельную сводку для каждой станции. Все станции и период их действия приводятся на схеме, описанной в предыдущем разделе, так что достаточно ограничиться сообщением о наличии данных по плювиографам и рядом основных станций с ежесуточными измерениями осадков. Для того чтобы можно было прочитать информацию о станции с длительным периодом наблюдения, возможно потребуется ее записать на нескольких страницах.

Предлагается включать в эту страницу описания наличия данных и информацию из таблицы 25.3.

### 25.3 Краткие сводки

Многие организации публикуют краткие сводки данных. Они могут включать: средние климатические данные, статистику осадков, данные и статистику о расходах и данные о качестве воды.

607003 РЕКА УОРРЕН	ФЕРМА УИТЛИ
Речной бассейн:	Река Уоррен
Местоположение:	Широта 34° 22' 14" ю. ш. Долгота 116° 16' 34" в. д.
Сеть AMG	6196500 с. ш. 50 433450 в. д.
<i>Характеристики водосбора</i>	
Площадь водосбора:	2 910 км <sup>2</sup>
Климатическая зона:	Средиземноморский климат; с низкими величинами осадков зимой
Среднее количество осадков:	735 мм/год (диапазон изменений 950–550)
Испарение с водной поверхности:	1 275 мм/год (диапазон изменений 1 250–1 400)
Геоморфология:	Рельеф низкий и средний: пологое плато, на котором лежит долина реки, бокситолитеритные почвы поверх скальных и каменистых образований
Формы рельефа:	Виды карт; атлас австралийских почв (ссылка 8) 16 % — Ub 90 рассеченные латериты; холмистая местность с вкраплением желтых почв каменистыми россыпями 14 % — Cb43, Tf6 заболоченные равнины; мелкая русловая сеть с выпуклоченным песком и подзолистой почвой 57 % — Cd22, Tc6 латеритное плато; возвышенности с песчаными и гравийными образованиями над слоем глины 13 % — Tf6, Ta9 долины рек; умеренные склоны, главным образом желтые подзолистые почвы
Естественная растительность:	Виды карт; съемка растительности WA (ссылка 1) 20 % — eMi лесистая местность; лесистая местность на рассеченных латеритных почвах 70 % — eMc леса; евкалиптовые леса на латеритном плато 10 % — mLi заболоченная лесистая местность; кленовые леса на заболоченных равнинах
Незаселенные земли:	Около 40 % площади без лесов (только 27 % расчищено в 1965 г.)
Землепользование:	Около половины водосбора — государственные леса, расчищенные районы в верховьях используются под овечьи пастбища и под поля для зерновых, в низовьях — для животноводства
Регулирование:	Небольшие сельские плотины на малых реках
<i>Детали гидрометрической станции</i>	
Период действия:	С мая 1970 г.
Классификация:	Гидрологическая сеть — водосбор главной реки
Оборудование станции:	L&S серво-манометр и самописец непрерывной записи. Каменистое контрольное сечение для низкого и среднего стока, гидрометрический створ для высокого стока
Регистрация уровня:	96,5 % зарегистрировано, 7,6 % с ошибками
Кривая расхода:	От низа до середины обусловлена контрольным сечением, от середины до верха связь со стоком хорошая, но, теоретически, вне диапазона измерений. Многочисленные измерения стока до 97,04 м <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup> , которые охватывают 99 % от общего зафиксированного стока
Степень чувствительности:	99 % стока <1; 100 % стока <2

Рисунок 25.1 — Пример страницы каталога данных

Таблица 25.2  
Детали, нанесенные на карту

Граница водосбора:	Масштаб и карта-источник, на основании которого была определена граница водосбора
Речная сеть:	Количество рек, которые должны наноситься на карту, зависит от площади водосбора. Источник информации
Масштаб водосбора:	Различный и зависит от размера бассейна
Осадкомерные станции:	Расположение и номера станций, период действия и тип осадкомера, например плювиограф суточной записи или суммарный
Изогиеты осадков: (необязательно)	Изогиеты среднегодовых осадков по водосбору с пояснениями
Землепользование: (необязательно)	По возможности, указать границы основного землепользования. Например: границы лесов, сельскохозяйственных и урбанизированных земель

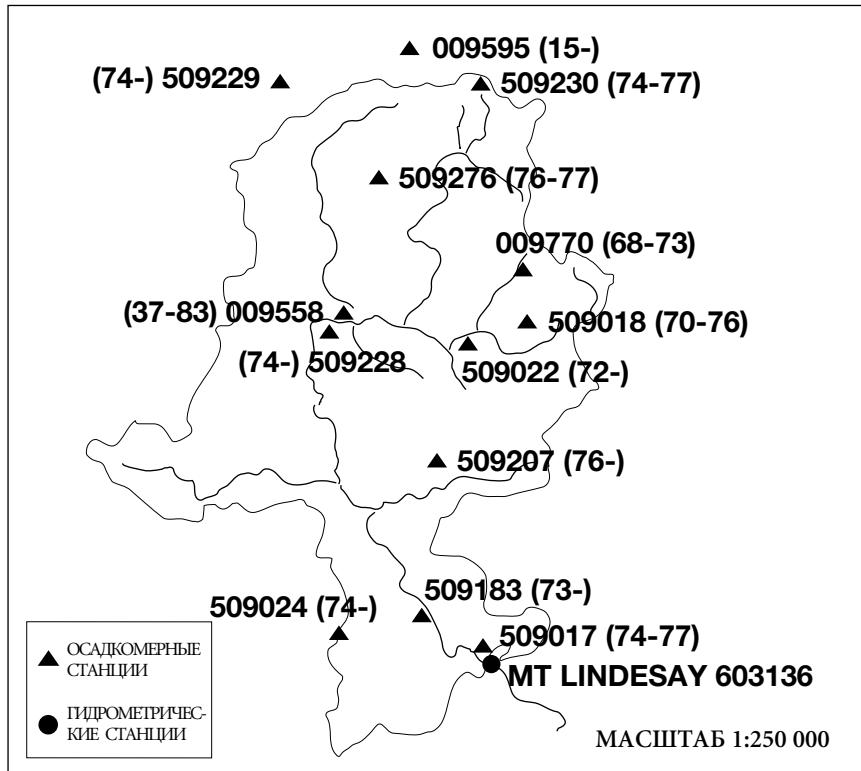


Рисунок 25.2 — Водосбор реки в Дании

Таблица 25.3

**Общие характеристики страниц по наличию данных**

Стоковые данные:	Имеющиеся данные наблюдений и их качество, четко представленные в ежемесячной форме
Данные об осадках:	Имеющиеся данные наблюдений осадков и их качество, четко представляемые от месяца к месяцу по базовым плювиографам и неавтоматическим осадкометрам. Период данных наблюдений может быть ограничен периодом работы гидрометрической станции из практических соображений
Качество воды:	<p>Количество ежегодно анализируемых проб, объединенных в следующие группы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) пробы только для базового анализа (какие-либо или все виды проводимости, pH, температура воды, параметры цвета и мутности);</li> <li>b) пробы на главные ионы;</li> <li>c) пробы на органику;</li> <li>d) пробы на тяжелые металлы или другие компоненты</li> </ul>

Обычно такие публикации состоят из информации о станции, включая: номер станции; координаты широты и долготы; тип наблюданной информации; другие характеристики створа (название, название реки, опорная сеть, площадь водосбора и т. д.); период действия; период обработки данных и сводки данных по измеренным ежесуточным, ежемесячным и годовым величинам (включая минимальное, максимальное и среднее значения). Информация может быть представлена в текстовом виде или оформлена на микрофише, а также может даваться на носителях, совместимых с компьютером, например на дисках или лазерных дисках (CD-ROM).

25.4        **Публикация данных**

[G25]

25.4.1      **Назначение**

Основная задача программы публикации данных заключается в создании удобных для большинства потребителей форм таблиц, схем графиков и кратких сообщений о наблюдениях, а также в обеспечении потребителей материалами о результатах вторичной обработки данных наблюдений. Регулярные публикации, которые включают обработанные данные, гарантируют их наличие в случае их утери или уничтожения невосстановимых данных наблюдений, и могут уменьшить количество специализированных обращений за информацией, на которые приходится отвечать центральной службе. Благодаря публикации, информация становится более доступной, и таким образом способствует гидрологическим исследованиям. Поскольку публикации могут содействовать международному обмену, очень важно, чтобы была высокая степень их достоверности и был установлен некий стандарт формата, единиц и т. д.

#### 25.4.2 *Периодичность публикаций*

Если основные требования к данным связаны с месячными и годовыми поставками водных ресурсов, то ежегодная публикация суммированных ежемесячных данных будет вполне достаточной. Ежегодники по данным о расходах воды, которые содержат ежемесячные объемы стока и экстремальные значения расходов и уровней, могут быть вполне достаточными.

Однако большая часть гидрологических исследований (например исследование моделей осадков и экстремального стока) требуют ежесуточных или даже более частых данных. Таким образом там, где возможно, публикации данных должны содержать суточную информацию об осадках, температуре и стоке воды, и такую информацию о снежном покрове, которая имеется; они должны издаваться ежемесячно или ежегодно.

Если данные публикуются нерегулярно, их следует обновлять в базе данных, и тогда регулярно должны распечатываться компьютерные сводки.

В тех случаях, когда имеются ежечасные данные, обычно выпускается месячная информация. Так же, если имеется большая заинтересованность в гидрологических прогнозах и связанной с ними информации, могут быть оправданы еженедельные публикации прогнозов.

В некоторых случаях, определенные требования могут предъявляться к редким публикациям данных, например публикуемых раз в пять лет. Эта периодичность наиболее удобна при изучении потенциального влияния климатических колебаний и изменения климата на водные ресурсы.

Специальные выпуски могут быть посвящены публикации экстремальных явлений, например сильным паводкам или засухам. Такие выпуски должны содержать все необходимые данные, графики, схемы, а также должны учитывать величину и повторяемость этих явлений в отношении многолетнего распределения вероятности.

#### 25.4.3 *Содержание и формат*

Содержание и формат публикаций определяются требованиями большинства потребителей. Обычно данные о стоке и уровне воды публикуются независимо от метеорологических наблюдений, хотя в некоторых странах вся информация о гидрологическом балансе издается в одном томе. В первом случае, желательно вместе с данными о стоке воды публиковать сводные материалы об осадках, снежном покрове и суммарном испарении в соответствующих бассейнах. Для таких сводок данные точечных измерений осадков должны быть усреднены по площади на основе одного из методов, рассмотренных в разделе 30.4.

В ежегодниках должен приводиться полный указатель станций наблюдений, включающий: их высоту над уровнем моря, широту, долготу, оборудование (с изменениями), период действия, организацию, отвечающую за программу наблюдений и место хранения исходной информации. В крупных странах указатели и данные следует группировать по большим водосборам, а не по политическому,

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДАННЫХ

Станция Широта и Долгота Высота Водосбор					Год Тип испарителя Тип осадкомера								
Испарение			Осадки								Снежный покров, водный эквивалент		
Месяц	Измененные потери воды (единицы измерения) (1)	Рассчитанное испарение с озера (2)	Суммарная солнечная радиация (ланглей) (3)	Всего	Всего жидких осадков	Всего твердых осадков	Максимальная интенсивность за продолжительность времени (в минутах)						
				5	10	15	30	60	120	360	1440	15th	Конец месяца

- 1) Потери воды из испарителя или другого инструмента
- 2) Потери воды преобразованные, для вычисления чистого испарения с водной поверхности
- 3) Можно заменить продолжительностью солнцестояния

Рис 25.3 Специальная таблица для ежегодных климатических и гидрологических сводок

Название участка .....		Номер станции .....										
Подробное описание местоположения * .....												
Тип измерительного устройства и метод измерения расхода .....												
Высота нуля графика .....												
Площадь водосбора.....												
Период действия, максимальное, минимальное и среднее значения стока .....												
Замечания.....												
Сводные данные за гидрологический год												
Месяц	Расход (единицы измерения)			Объем стока		Средние осадки по бассейну (единицы)	Средний водный эквивалент на конец месяца (единицы)					
	Максимальный**	Минимальный**	Средний	Единицы объема	Слой стока (единицы)							
Октябрь Ноябрь Декабрь Январь и т. д. Сентябрь												
За год												
Средний суточный расход (единицы) — Гидрологический год ....												
День	Окт.	Нояб.	Дек.	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.
1												
2												
3				***								
и т. д.												
30												
31												
Максимальный расход в течение года..... время ..... дата .....												
Минимальный расход в течение года..... время ..... дата .....												

\* Оно может определяться указанием расстояния от фиксированного пункта, моста, на котором установлено водомерное устройство, или расстояния от ближайшей деревни или города, или другими удобными способами.

\*\* Эти колонки используются для записи расчетных значений максимального и минимального расхода. Если эти значения вычислены не на основании уровневых данных постоянного автоматического самописца, а как то иначе, их следует отметить буквой «E». Максимальные и минимальные суточные расходы за месяц можно показать подчеркиванием в таблице суточных значений.

\*\*\* Сплошная линия, справа от значения расхода, указывает на ледостав. Пунктирная линия указывает на наличие ледохода, а сплошной треугольник ( $\Delta$ ) может использоваться для обозначения затора, видимого со станции.

Рисунок 25.4 — Предлагаемый формат для публикации данных о стоке воды (18,5 × 17,5)

административному или чисто алфавитному делению. Карты водосборных бассейнов с промаркированными станциями, находящимися в них, являются весьма ценной информацией, которую, по возможности, следует включать в публикуемые ежегодники. В странах, где данные публикуются чаще одного раза в год, только один выпуск в год должен содержать индекс станций. Там, где не выпускаются ежегодники или другие регулярные публикации данных, следует публиковать периодические издания каталогов станций (раздел 25.2).

Форматы, предложенные для публикации климатологических данных, представлены в *Руководстве по климатологическим практикам* [1]. Однако эти форматы не включают информацию о нескольких важных параметрах, измеряемых на гидрологических станциях, например об испарении и интенсивности выпадения осадков. Предлагаемые для таких данных и для расходов воды форматы показаны соответственно на рисунках 25.3 и 25.4. Кроме информации которая указана в названии этих форматов, желательно включать также некоторую информацию, касающуюся характера дренируемого бассейна, кривой расхода, максимальных и минимальных значений, измеренных расходов, а также характеристику устойчивости речного русла. Местные потребности могут быть рассмотрены в выбранных или пересмотренных форматах публикаций данных.

К рисунку 25.4 можно сделать замечание в отношении того, что гидрологический год не всегда совпадает с календарным. Во многих странах, где наблюдаются заметные сезонные колебания стока, часто желательней выбрать такой гидрологический год, который начинается и кончается, когда маловероятно существенное влияние пополнения стока воды за счет прошлогодних запасов, и, таким образом, гидрологический год приближается к гидрологически значимой временной единице. Например, в регионах северного полушария с суровым зимним периодом и значительными запасами снега, который выпадает в ноябре, декабре и не тает до апреля, при использовании календарного года могли бы возникнуть затруднения при совместном анализе годовых данных об осадках и стоке. В таких регионах часто гидрологический год охватывает период с октября по сентябрь. В других регионах используют иные периоды для того, чтобы свести до минимума влияние перехода запасов воды из одного года в другой.

Конечно, возникают проблемы при составлении таблиц с данными о речном стоке, когда в качестве основы принимается не календарный год, так как в основе климатических данных лежит календарный год. Решение этих несоответствий зависит от важности перехода сезонных и месячных компонентов гидрологического баланса в климатическом режиме данного региона.

## 25.5 Магнитные носители информации

[G30]

Магнитные носители, используемые для передачи информации, — это магнитные ленты и диски; важность последних в последнее время все больше возрастает, благодаря широкому применению персональных компьютеров.

### 25.5.1 *Ленты*

Стандартные магнитные ленты (9-дорожечные, шириной 12,7 мм (0,5 дюйма)) бывают разной длины; самая распространенная имеет длину 732 м (2 400 футов), но встречаются и более короткие ленты, например: длиной 90 м (300 футов), 180 м (600 футов), 365 м (1 200 футов), которые пригодны для передачи небольших комплектов данных. Ленты должны иметь кольцо защиты, дающее возможность сделать первоначальную запись данных и обеспечивающее их защиту от случайного последующего наслонения.

Данные на ленту можно записывать в разных форматах и с различной плотностью записи. Некоторые из этих форматов зависят от организации данных на ленте; этот вопрос рассмотрен в следующем разделе. Для форматов, которые связаны с характеристиками записи драйвера ленты, рекомендуются следующие стандартные характеристики:

- a) плотность записи 800 bpi (битов на дюйм), см. ниже;
- b) метод записи — без возвращения к нулю (NRZI);
- c) нечетный паритет;
- d) расширенный двоично-десятичный метод кодирования данных (EBCDIC);
- e) отсутствие маркеров на ленте;
- f) разделение файлов данных одиночной меткой;
- g) конец ленты отмечается двумя метками.

При обычной плотности записи в 1 600 bpi и даже 6 250 bpi, плотность в 800 bpi является самой большой допустимой плотностью для самых распространенных методов записи NRZI. Пока еще не стандартизирован, так называемый метод поэтапного кодирования, используемый для высокой плотности записи. Использование более низкой плотности записи сокращает количество ошибок, связанных с нецентрированностью записывающей/считывающей головки, и делает возможным использование дешевой ленты более низкого качества.

Проверка паритета во внутренней системе для установления надежности операций записи/считывания почти всегда такая, как определено выше, так как использует метод двоично-десятичного кодирования — EBCDIC. Даже если система EBCDIC не используется для кодирования, практически все другие системы позволяют применять ее в качестве альтернативной.

Ленточные маркеры, на которых записывается информация при помощи оперативной системы, чтобы облегчить идентификацию и поиск информации, почти полностью зависят от механики. В качестве альтернативы должны использоваться форматы без меток на ленте. Вся необходимая для идентификации информация должна записываться в файл данных, записанный на ленте в том же формате, что и остальные данные.

Стандартная длина логической записи составляет 80 байтов и определяется шириной современных экранов дисплеев и в недавнем прошлом — широким распространением перфокарт. Поскольку большинство программного обеспечения и многие периферийные устройства предназначены для 80-байтовых записей, рекомендуется использовать именно эту или более короткую длину. Кроме того, рекомендуется использовать фиксированную длину записи в 80 байтов для всех физических записей, независимо от фактической длины логической записи.

Хранение информации на магнитных лентах улучшилось, благодаря блокированию записей [3]. При факторе блокирования, равном 20, создается блок данных в 1 600 байтов. Длина записи и длина блока, используемые для обмена ленты, должны оставаться неизменными, во всем томе. Таким образом, все логические файлы данных, записанные на ленту, будут представлять собой последовательность блоков. В связи с ограниченностью размера буфера в некоторых машинах рекомендуется использовать блоки размером не более 2 000 байтов.

Существенным компонентом организации данных является использование тома, т. е. названий ленты и файлов данных, в которых содержится подробное описание содержания и формата ленты, а также характеристики тех конкретных гидрологических станций, от которых получена информация.

Когда требуется более гибкий формат, необходимо использовать информационные поля, которые могут определять переменные. Такая система основана на широком использовании кодов для определения поля.

### 25.5.2 *Магнитные диски*

В последнее время значительно возросло использование дисков во всех типах компьютеров для передачи небольших комплектов данных. Для микрокомпьютеров диски являются наиболее широко применяемым средством хранения информации, с помощью которого данные могут передаваться от одной машины к другой.

В настоящее время широко используются дискеты следующего размера:

- a) 5,25" (13 сантиметров) двусторонний, двойной плотности (2S/2D) с емкостью в 360 Кбайтov;
- b) 5,25" (13 сантиметров) двусторонний, двойной плотности (2S/HD) с емкостью в 1,2 Мбайтov;
- c) 3,5" (9 сантиметров) диск (двойной и высокой плотности) с емкостью от 0,75 до 2,0 Мбайтov.

В отличие от лент, потребитель в этом случае осуществляет ограниченный контроль за форматом записи на диск. Характер записи данных на диске означает, что должен присутствовать указатель содержимого для определения физического расположения файлов. В настоящее время большинство организаций используют

или оперативную среду ДОС для совместимых с IBM компьютеров, или среду Макинтош. Для передачи данных рекомендуется использовать Американский стандартный код для обмена информацией (ASCII). В настоящее время имеется программное обеспечение для преобразования файлов при передаче их от одной машины к другой.

### 25.5.3 *Лазерные диски*

Лазерный диск представляет собой блестящий пластиковый диск диаметром 12 см. Он покрыт чувствительной для лазера пленкой, защищенной тонким слоем прозрачного пластика. Любая информация, которую можно перевести в цифровой вид (слова, музыкальные ноты и т. д.), может быть записана на диск с помощью лазерного луча высокой мощности, который прожигает отверстия в чувствительной пленке соответствующим образом. Для вывода информации потребитель вставляет лазерный диск в специальный дисковод. Лазерный луч низкой интенсивности внутри дисковода сканирует поверхность вращающегося диска, проходя через пластик при попадании на отверстие. Электронные чипы преобразуют появляющиеся при этом вспышки в понятную информацию, которая может трансформироваться в звуки или записи информации с помощью компьютера. Лазерные диски обладают огромным объемом памяти — в несколько сот раз большим, чем память обычных дисков, и равным 5 полным магнитным лентам. Возможным недостатком является необратимость записи на магнитный диск, т. е. ошибки, допущенные при записи, невозможно исправить. Однако большим преимуществом их является быстрота поиска и вывода информации.

## 25.6 **Форматы обмена данными в реальном масштабе времени [G40]**

До сих пор рассматривались вопросы, связанные с передачей архивных данных. Имеется также острая необходимость утилизировать общие форматы для передачи данных в реальном масштабе времени. ВМО решила эту проблему и в рамках Всемирной службы погоды утвердила общие стандарты по обработке и передаче данных. Стандартные форматы, определенные в справочных наставлениях Глобальной системы телесвязи Всемирной службы погоды, сгруппированы по ряду областей применения, которые отвечают различным потребностям метеорологов и гидрологов. В *Наставлении по кодам* [2] описаны коды HYDRA и HYFOR, которые следует применять в любых системах передачи гидрологических данных, их применение также является обязательным при международном обмене данными (раздел 4.4).

Код HYDRA предназначен для распространения данных наблюдений за уровнем и расходом воды, осадками, снежным покровом, температурой воды и воздуха и ледовыми условиями. Код HYFOR, используемый для передачи гидрологических

прогнозов, уточняет данные об уровнях, расходах и ледовых явлениях. В каждом прогнозе может содержаться время наступления ожидаемого явления и/или период действия прогноза. Для обоих кодов необходимо указывать номерной индекс станции.

### Список литературы

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Руководство по климатологическим практикам*. Второе издание, ВМО-№ 100, Женева.
2. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Наставление по кодам*. Том I, Международные коды. ВМО-№ 306, Женева.
3. World Meteorological Organization/Food and Agriculture Organization, 1985: *Guidelines for Computerized Data Processing in Operational Hydrology and Land and Water Management*. WMO-No. 634, Geneva.



## ЧАСТЬ D

# ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

### ГЛАВА 26

## ВВЕДЕНИЕ В ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

#### 26.1      **Методы анализа, применяемые в гидрологии**

Гидрологический анализ обычно основан на использовании хорошо разработанных принципов гидродинамики, термодинамики и статистики. Центральной проблемой в гидрологическом анализе, однако, является применение этих принципов к природной среде, которая отличается неоднородностью, слабой освещенностью наблюдениями и лишь частичной изученностью. Изученные явления обычно не поддаются планированию и проверке. Анализы выполняются с целью получения пространственно-временной информации о некоторых переменных величинах, региональных обобщениях и взаимосвязях между переменными. Часто соответствующие элементы непосредственно не измеряются. Анализы могут выполняться с помощью различных подходов, таких, как детерминированный, параметрический, вероятностный и стохастический. Анализ, основанный на детерминированном подходе, следует закономерностям, которые описывают физические и химические процессы. При параметрическом подходе анализ делается посредством сравнения гидрологических данных, наблюдаемых в разных пунктах и в разное время. При вероятностном подходе анализируется частота появления различных значений гидрологических переменных. При стохастическом подходе анализируются как последовательность, так и частота появления различных величин.

Существуют переменные, которые измеряются непосредственно, например уровень и скорость течения, или которые вычисляются прямо по результатам измерения, например расход воды. Другие переменные рассчитываются на основании набора данных прямых измерений, например слой осадков на водосборе. Оценку других переменных, таких, как испарение с поверхности озера, можно осуществлять только косвенным путем.

Во многих случаях измеренные переменные не могут служить наиболее подходящим объектом для анализа. Например, при анализе генетических составляющих стока гидрограф часто расчленяется на отдельные компоненты таким образом, что его часть, обусловленная выпадением отдельного ливня, отделяется от остальной части гидрографа. Такое расчленение производится путем расчета, основанного скорее на аналитических моделях, чем на физических измерениях.

Анализы включают исследование единичных случаев и статистическое изучение массовых данных. Статистический анализ включает в себя исследование соответствия данных законам распределения и параметризацию моделей путем регрессионного анализа или анализа временных рядов. Обоснованность полученных связей должна проверяться на независимых данных. Типичным гидрологическим тестом является построение гидрографа стока.

Как степень детальности, так и точность анализа должны соответствовать качеству и адекватности выборки имеющихся данных, а также точности, требуемой при применении результатов анализа. Следует учитывать связь между стоимостью и продолжительностью проведения анализа с учетом предполагаемой выгоды. Во многих случаях графические и другие относительно простые расчетные методы являются более эффективными с точки зрения затрат, чем более сложные методы, и достаточно точными с точки зрения достижения поставленных целей и получения необходимых данных.

## 26.2 Содержание части D

В части D настоящего *Руководства* представлены широкоизвестные методы анализа, которые в целом отвечают большей части гидрологических задач. Альтернативные методы приводятся для удовлетворения практических запросов в тех случаях, когда имеется большое количество разнотипных данных.

Анализы могут служить одной или нескольким целям, таким, как проектирование сетей, оценка контрольных измерений, прогнозирование речного стока, а также планирование программ по освоению водных ресурсов. Методы анализа, ориентированные прежде всего на решение одной задачи, излагаются в той части данного *Руководства*, которая посвящена решению этой цели. Например, методы, используемые главным образом для прогнозирования речного стока, излагаются в части E, а методы расчета требуемой емкости водохранилища представлены в части F. В частях E и F показана последовательность операций, часто состоящих из нескольких этапов вычислений, необходимых для составления прогнозов и получения расчетных значений.

Методы, рассмотренные в части D, являются общими. При необходимости, на эти общие методы делаются ссылки в других главах. Главы, представленные в этой части, не являются исчерпывающими ни с точки зрения глубины, ни с точки зрения широты рассмотрения темы; не следует также считать, что описанные методы являются наиболее оптимальными для той или иной ситуации. Читатель может выйти за пределы настоящего *Руководства* и обратиться к другим методам, которые могут оказаться более подходящими для решения данной проблемы. Выбор отдельных методов для решения реальных проблем должен основываться на соответствии их фактическим гидрологическим условиям, для которых метод будет применяться, а также на наличии данных, требуемых для применения этих методов.

## ГЛАВА 27

### ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ

#### **27.1 Использование частотного анализа в гидрологии**

Многие экстремальные гидрологические явления невозможно прогнозировать с высокой надежностью и достаточной заблаговременностью на основе детерминированной информации из-за того, что такие прогнозы чувствительны в отношении наступления события. В таких случаях необходим вероятностный подход для того, чтобы отразить эту особенность при принятии решений. Если допустить, что такие явления независимы во времени, т. е. время появления и величина такого события не имеют отношения к предшествующим явлениям, можно использовать частотный анализ для описания вероятности наступления одного или нескольких таких явлений во времени. К гидрологическим явлениям, которые обычно описываются с помощью частотного анализа, относятся ливневые осадки (глава 29) и максимальный годовой сток (глава 36).

Частотный анализ может выполняться графически или математически. При графическом подходе исторические данные наблюдений за рассматриваемой переменной располагаются в возрастающем или в убывающем порядке, после чего строится графическая зависимость между рассматриваемыми явлениями и относительными оценками вероятности превышения или повторяемости. Затем через нанесенные точки проводится плавная кривая, которая описывает вероятность появления такого события в будущем. Существует специальная клетчатка вероятностей, которая используется для трансформации плавной кривой в прямую линию.

Математический подход к частотному анализу основан на применении специального математического аппарата, известного как вероятностное распределение, позволяющего описать соответствующей плавной кривой поле точек на графике. Параметры распределения вероятности определяются как функции статистик данных гидрологических наблюдений.

#### **27.2 Статистические ряды и периоды повторяемости**

При вероятностном анализе ряды представляют собой удобную последовательность данных наблюдений, например: за часовой, суточный, сезонный или годовой интервалы времени — для какой-либо гидрологической переменной. Если ряд таких наблюдений охватывает все явления, которые имели место в течение данного периода времени, такой ряд называется полным [1]. Для удобства ряд часто

содержит только те явления, которые по величине превышают заданный уровень. Такой ряд называют усеченным. Если ряд включает явления, имевшие наивысшие значения в каждом отдельном году, такой ряд называется рядом годовых максимумов.

Ряд годовых максимумов обычно используется при вероятностном анализе по двум причинам. Во-первых, из-за его удобства, поскольку большая часть данных обрабатывается таким образом, что сразу получается готовый ряд годовых значений. Во-вторых, потому что существует теоретическая основа для экстраполяции таких рядов годовых данных за пределы наблюдений; однако в случае усеченных рядов такая теоретическая основа отсутствует. Причиной такого положения в случае усеченных рядов является несоблюдение принципа независимости явлений, которые могут следовать один за другим в тесной последовательности.

Ограниченностю ряда годовых значений заключается в том, что каждый год представлен только одним явлением. Второе по значению явление в течение одного и того же года может даже превысить выдающиеся явления, наблюденные в другие годы, однако оно не попадет в ряд. Соответственно явление одного и того же порядка будет иметь различную частоту проявления для каждой из двух серий.

Для серий с полной продолжительностью может потребоваться применение стохастического подхода, при котором независимость переменных не требуется. Они могут также применяться для вероятностного анализа данных применительно к аридным районам, где все явления бывают редкими и практически независимыми.

Период повторяемости  $T_r$  данного явления представляет собой среднее число лет, в течение которых предполагается, что данное явление произойдет однажды или будет превышено только один раз. Если предполагается, что данное явление может произойти или быть превышено каждые  $N$  лет, то оно считается  $N$ -летним событием  $X_{Tr}$ . Оба эти параметра характеризуют ожидаемую среднюю повторяемость какого-либо явления в течение многих лет. Период повторяемости есть величина, обратная величине вероятности превышения за год.

При определении периодов, повторяемостью более 10 лет, разница в значениях повторяемости для полных и неполных рядов несущественна. Таблица 27.1 содержит переходные значения от одной повторяемости к другой.

Таблица 27.1

**Соответствие периодов повторяемости для полных и усеченных рядов**

Усеченные ряды	Годовые ряды
0,50	1,16
1,00	1,58
1,45	2,00
2,00	2,54
5,00	5,52
10,00	10,50

## 27.3 Математический подход к частотному анализу

### 27.3.1 Распределения вероятностей, используемые в гидрологии

Во многих гидрологических исследованиях используются распределения вероятностей, например: при определении водных ресурсов, экстремальных величин стока, маловодий, объемов водохранилищ, количества осадков, а также при моделировании временных рядов. Основные распределения, используемые в гидрологии, приведены в таблице 27.2. Математическая трактовка этих распределений дана в публикации BMO *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis* [2] (Статистические распределения для анализа повторяемости паводков).

Годовые выборки, такие, как объемы годового стока или слой годовых осадков, стремятся к нормальному или близкому к нему закону распределения согласно центральной предельной теореме. Месячные и недельные выборки менее симметричны, обладают определенной асимметрией (в большинстве случаев положительной) и обычно не могут моделироваться с использованием нормального закона распределения.

Ряды годовых экстремальных величин (максимальных или минимальных), а также значений, превышающих заданный уровень, имеют положительное асимметричное распределение. Часть выборки, которая располагается около среднего распределения, может быть описана различными распределениями. Однако эти отдельные распределения могут существенно отличаться друг от друга в отношении значений, определенных за периоды большой продолжительности. Поскольку гидравлический расчет часто основан на оценках явлений редкой повторяемости, важно иметь возможность определить их как можно точнее. Поэтому для таких случаев выбор распределения очень важен. Вопрос о выборе распределений обсуждается в [2], где описываются имеющиеся методы выбора между законами распределений и то, как этот выбор зависит от ряда технических проблем, таких, как характер гидрологических данных и метод оценки параметров.

### 27.3.2 Оценка параметров

Не только выбор закона распределения, но и метода, используемого для оценки параметров, может влиять на результат. В гидрологии традиционно популярен метод моментов (ММ), хотя он и признан статистически неэффективным по сравнению с методом максимального правдоподобия (МП). Во многих случаях удобен для использования метод вероятностно-взвешенных моментов (ВВМ), внедренный Гринвудом и др. [3]; Хоскинг и др. [4] нашли, что этот метод может быть сравним с МП в отношении его статистических свойств применительно к размерам выборок, обычно встречаемых в гидрологии.

Одним из последних методологических достижений является использование метода L-моментных статистик [5], показавшим существенное улучшение по сравнению с более традиционным методом максимального правдоподобия или методом моментов. Применение этого регионального метода на примере отдельных регионов начато с анализа экстремальных величин.

Таблица 27.2  
Вероятностные распределения, используемые в гидрологии

<i>Наименование распределений</i>	<i>Сокращенное название</i>	<i>Ссылка на литературный источник</i>
Нормальное распределение	(N)	(Гаусс)
Логарифмически нормальное распределение	(LN)	(Хазен, 1914 г.)
Распределение Пирсона 3-го типа	(P3)	(Фостер, 1924 г.)
Распределение экстремальных величин 1-го типа	(EV1)	(Гамбел, 1941 г.)
Распределение экстремальных величин 2-го типа	(EV2)	(Гамбел, 1941 г.)
Распределение экстремальных величин 3-го типа	(EV3)	(Дженкинсон, 1969 г.)
Трехпараметрическое гамма-распределение		(Крицкий, Менкель, 1946 г.)
Гамма-распределение	(G)	(Моран, 1957 г.)
Логарифмическое распределение Пирсона 3-го типа	(LP3)	(Совет США по водным ресурсам, 1967, 1981 гг.)
Обобщенное распределение экстремальных величин	(GEV)	(Дженкинсон, 1955 г.)
Распределение Вейбулла		(Ву и Гудбридж, 1976 г.)
Распределение Уэйкби	(WAK)	(Хаутон, 1978 г.)
Распределение Баутона		(Баутон, 1980 г.)
Двухкомпонентное распределение экстремальных величин	(TCEV)	(Росси и др., 1984 г.)
Лог-логистическое распределение	(LLG)	(Ахмад, и др., 1988 г.)
Обобщенное логистическое распределение	(GLG)	(Ахмад, 1988 г.)

### 27.3.3 Однородность данных

Однородность гидрологических данных — требование, необходимое для обоснованного применения статистического подхода. Существует множество причин неоднородности рядов, например:

- a) временной ряд максимальных расходов воды может включать как расходы воды от снеготаяния, так и от дождя;
- b) временной ряд может включать в себя расходы воды, полученные в естественных условиях до строительства гидротехнического сооружения и после его строительства, когда режим стока стал нарушенным;
- c) временной ряд может содержать расходы воды, включающие как систематическую, так и случайную погрешности.

Кроме того, однородность данных может быть также нарушена вследствие антропогенных изменений климата.

Детальный анализ данных является самым эффективным способом оценки их однородности. Методы такого анализа основаны, как правило, на построении разного рода зависимостей между стоком и стокообразующими факторами (физических и математических) для выявления причин нарушения однородности. При установлении неоднородности и выявлении причин этой неоднородности возможны следующие способы восстановления временных рядов:

- a) неоднородные данные корректируются с целью приведения к однородным условиям (восстановление естественного стока, расчет эмпирических повторяемостей и т. п.);
- b) ряд разбивается на отдельные однородные выборки (расходы воды, образуемые селевыми потоками; максимальные дождевые расходы, наличие и отсутствие стока и т. д.);
- c) известные систематические погрешности корректируются и сомнительные данные исключаются из ряда.

### Список литературы

1. Shaw, T. T., 1964: Frequency analysis. *Handbook of Applied Hydrology* (V. T. Chow, ed.), Section 8-I, McGraw-Hill, New York.
2. World Meteorological Organization, 1989: *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis* (C. Cunnane). Operational Hydrology Report № 33, WMO-No. 718, Geneva.
3. Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C. and Wallis, J. R., 1979: Probability weighed moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1049–1054.
4. Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. and Wood, E. F., 1985: Estimation of the generalized extreme value distribution by the method of probability-weighted moments. *Technometrics*, Vol. 27, No. 3, pp. 257–261.
5. Hosking, J. R. M., 1990: L-Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society, B*, Vol. 51, No. 3.



## ГЛАВА 28

# ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОЖДЕВЫХ ОСАДКОВ

### 28.1        **Повторяемость дождевых осадков**

Данные о повторяемости выпадения дождевых осадков различной величины важны при использовании математических моделей для удлинения гидрологических рядов, при определении необходимой емкости малых водорегулирующих сооружений и в ряде других случаев. Вследствие редких измерений стока и ограничений при переносе таких данных на малые территории, расчетные величины стока с малых площадей часто основываются на связях осадки—сток и на данных о повторяемости дождевых осадков. Обобщенные оценки повторяемости дождевых осадков продолжительностью до 10 дней с периодом повторяемости до 100 лет для территории США представлены в техническом докладе Бюро погоды США и в атласе НУОА, а для территории Австралии, — среди прочих публикаций, в работе *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flow Estimation* [1] (Осадки и сток Австралии: Руководство по расчету стока).

В главе 27 представлены основные соображения о частотном анализе; в этой же главе рассматриваются отдельные случаи его применения для анализа дождевых осадков. Выбор типов распределения для рядов экстремальных осадков рассмотрен в публикации ВМО *Selection of Distribution Types for Extremes of Precipitation* [2] (Выбор типов распределения для экстремальных осадков).

#### 28.1.1        **Осадки в точке**

Для малых водохранилищ осадки, измеренные в точке, служат адекватной оценкой осадков для водохранилища; для более крупных территорий необходимо рассматривать связь между слоем осадков и площадью водохранилища (раздел 28.1.2). Представленные в данном разделе статистические методы применимы к ливневым и другим кратковременным дождевым осадкам. Подобные методы используются применительно к мгновенным расходам, объемам паводков, низкому стоку, засухам и прочим экстремальным явлениям.

#### 28.1.1.1        *Приведение данных к одному расчетному периоду*

Данные о дождевых осадках обычно публикуются по фиксированным интервалам времени, например: 0800–0800 (1 раз в сутки), 0600–1200 (каждые 6 часов), 0300–0400

(каждый час). Такие данные редко отражают фактические максимальные величины за указанные периоды. Например, с большой вероятностью можно утверждать, что максимальное наблюденное в году значение, полученное по ежедневным наблюдениям, будет существенно меньше значения, полученного по наблюдениям через 6-часовые интервалы времени, не привязанные к конкретному сроку наблюдений. Аналогично максимумы, полученные по наблюдениям за фиксированные 6-часовые интервалы и часовые интервалы, соответственно будут меньше максимумов, полученных по ежеминутным наблюдениям за те же периоды, не привязанным к фиксированному началу и концу наблюдений.

Изучение огромного количества данных о дождевых осадках методом годостанций показывает, что умножение годовых максимальных значений осадков, полученных в течение года по наблюдениям за часовые или суточные интервалы времени при едином фиксированном интервале времени (от 1 часа до 24 часов) на 1,13, дает величины осадков, близкие к тем, которые получаются при анализе фактических максимумов. Меньшая корректировка требуется в том случае, когда максимальные величины определяются по данным наблюдений при двух или более фиксированных интервалах времени. Таким образом, например, максимальные 6-часовые и 24-часовые величины, определенные по 6 и 24 последовательным 1-часовым наблюдениям, требуют соответственно введения поправок 1,02 и 1,01. Приведение величин дождевых осадков, определенных по фиксированным интервалам времени, к другим временным единицам в пределах данного интервала может проводиться следующим образом:

Число единиц наблюдений:	1	2	3–4	5–8	9–24	> 24
Поправочный коэффициент:	1,13	1,04	1,03	1,02	1,01	1,00

### 28.1.1.2 Косвенная оценка повторяемости дождевых осадков в точке

При отсутствии пригодных для интерполяции данных об осадках за короткие промежутки времени в данной точке или поблизости, режим дождевых осадков может быть оценен по имеющимся косвенным данным [3, 4]. К таким косвенным данным относятся среднегодовые осадки и среднее в году число дней с дождями, которые можно определить по картам или вычислить. Для территории США среднее соотношение между слоем осадков за день с осадками (среднегодовые осадки, деленные на число дней с осадками не менее 1 мм) и слоем дождевых осадков 24-часовой продолжительности и повторяемостью один раз в 2 года имеет следующий вид:

Слой осадков за дни с осадками, мм:	5	8	10	13
Слой осадков 24-часовой продолжительности и повторяемостью один раз в 2 года, мм:	36	56	79	107

Приведенное в этой таблице соотношение дано просто для примера. В силу региональной изменчивости такого соотношения его применение должно основываться на сходстве климатических условий региона, для которого оно получено и того региона, где оно используется.

Для продолжительностей осадков менее 24 часов удобно оценивать величины дождевых осадков продолжительностью в один час на основании значений осадков 24-часовой продолжительности с последующей интерполяцией данных для промежуточных значений продолжительности и экстраполяцией для продолжительностей менее одного часа. Соотношение между осадками продолжительностью в один час и повторяемостью один раз в 2 года и 24-часовыми осадками той же повторяемости зависит от среднего годового числа дней с грозами. Исследования, охватившие широкий диапазон климатических условий, выявили следующую зависимость:

Соотношение величин 1-часовых и 24-часовых осадков повторяемостью раз в 2 года:	0,2	0,3	0,4	0,5
Среднее годовое число дней с грозами:	1	8	16	24

Значения осадков заданной повторяемости с продолжительностью менее одного часа часто определяют путем косвенного расчета. Данные об осадках такой короткой продолжительности редко имеются в готовом виде, удобном для составления рядов за годовой или более короткий промежуток времени, пригодных для непосредственного анализа повторяемости. Для оценки повторяемости дождевых осадков такой короткой продолжительности часто используют средние соотношения между количеством дождевых осадков за 5-, 10-, 15- и 30- минутные интервалы и часовыми осадками, рассчитанные по данным сотен гидростанций. Эти соотношения, имеющие среднюю погрешность менее 10 %, имеют следующий вид:

Продолжительность осадков (минуты):	5	10	15	30
Отношение (n-минут к 60 минутам):	0,29	0,45	0,57	0,79

Таким образом, если, например, ливень продолжительностью в один час и повторяемостью один раз в 10 лет дает слой осадков, равный 70 мм, то ливень продолжительностью в 15 минут и повторяемостью один раз в 10 лет даст слой осадков, равный 40 мм (т. е. 57 % от 70).

Следует иметь в виду, что применение этих соотношений в некоторых регионах может привести к ошибочным результатам. Например, в регионах, где большая часть дождевых осадков выпадает при грозах, эти отношения будут занижать фактические величины. С другой стороны, в регионах, где выпадение большей части дождевых осадков связано с орографическими факторами и слабо зависит от конвективной деятельности, применение этих соотношений может привести к завышенному результату. Такая изменчивость вышеуказанного соотношения была выявлена на

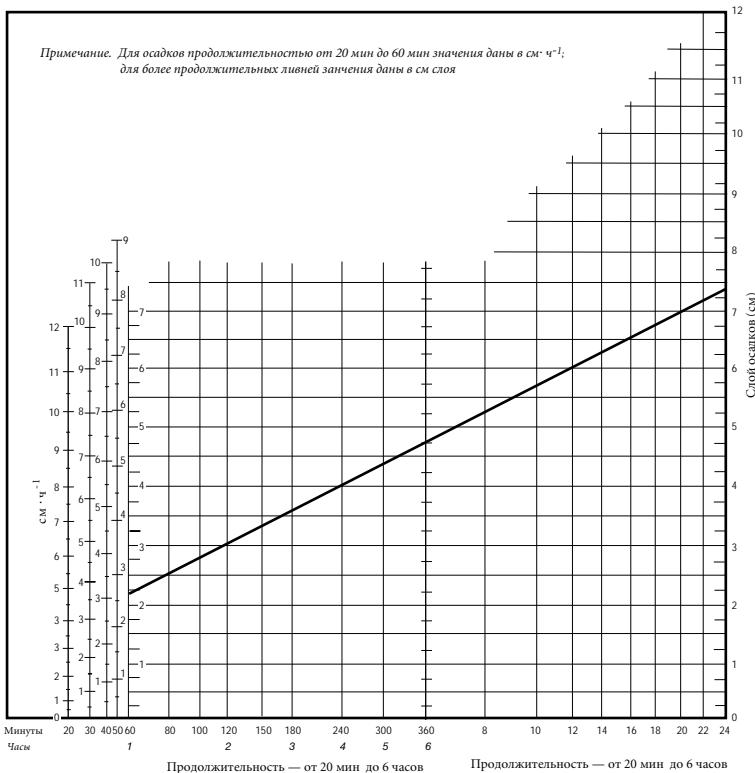


Рисунок 28.1 — Зависимость между интенсивностью дождевых осадков, их продолжительностью и слоем

примере территории Австралии [5, 6], где переменными величинами в соотношении являлись географическое положение и ливни продолжительностью в 1 час. Это соотношение также зависит от среднего интервала повторяемости. Если частотному анализу подвергается большое количество данных по дождевым осадкам по какому-либо региону, как например, при подготовке обобщенных карт, составление рядов годовых данных для всех градаций продолжительности является занятием утомительным и трудоемким. Поэтому, как правило, такие ряды ограничиваются данными о сравнительно небольшом числе станций с надежными рядами наблюдений в течение, по крайней мере 10 лет. Затем рассчитываются средние значения для годовых рядов, которые используются для подготовки графиков, подобно представленному на рисунке 28.1, который позволяет оценить значения ливней продолжительностью до 24 часов, если известны значения осадков продолжительностью в один и 24 часа.

**Максимальные наблюденные точечные  
дождевые осадки по земному шару**

<i>Продолжи- тельность</i>	<i>Слой (мм)</i>	<i>Местоположение</i>	<i>Дата</i>
1 мин	38	Барот, Гваделупа	26 ноября 1970 г.
8 мин	126	Фюссен, Бавария	25 мая 1920 г.
15 мин	198	Плам-Поинт, Ямайка	12 мая 1916 г.
20 мин	206	Куртя-де-Арджеш, Румыния	7 июля 1889 г.
42 мин	305	Холт, штат Монтана, США	22 июня 1947 г.
1ч 00 мин	401	Шангди, Внутр. Монголия, Китай	3 июля 1975 г.
2ч 10 мин	483	Рокпорт, штат Западная Виргиния, США	18 июля 1889 г.
2ч 45 мин	559	д'Хенис, штат Техас, США (17 миль к с.—с. з.)	31 мая 1935 г.
4ч 30 мин	782	Сметпорт, штат Пенсильвания, США	18 июля 1942 г.
6ч	840	Мудоцайдан, Внутр. Монголия, Китай	1 августа 1977 г.
9ч	1087	Белув, Реюньон	28 февраля 1964 г.
10ч	1400	Мудоцайдан, Внутр. Монголия, Китай	1 августа 1977 г.
18ч 30 мин	1689	Белув, Реюньон	28–29 февраля 1964 г.
24ч	1825	Фок Фок, Реюньон	7–8 января 1966 г.
2 суток	2467	Опер, Реюньон	7–9 апреля 1958 г.
3 суток	3130	Опер, Реюньон	6–9 апреля 1958 г.
4 суток	3721	Черапунджи, Индия	12–15 сентября 1974 г.
5 суток	4301	Коммерсон, Реюньон	23–27 января 1980 г.
6 суток	4653	Коммерсон, Реюньон	22–27 января 1980 г.
7 суток	5003	Коммерсон, Реюньон	21–27 января 1980 г.
8 суток	5286	Коммерсон, Реюньон	20–27 января 1980 г.
9 суток	5692	Коммерсон, Реюньон	19–27 января 1980 г.
10 суток	6028	Коммерсон, Реюньон	18–27 января 1980 г.
11 суток	6299	Коммерсон, Реюньон	17–27 января 1980 г.
12 суток	6401	Коммерсон, Реюньон	16–27 января 1980 г.
13 суток	6422	Коммерсон, Реюньон	15–27 января 1980 г.
14 суток	6432	Коммерсон, Реюньон	15–28 января 1980 г.
15 суток	6433	Коммерсон, Реюньон	14–28 января 1980 г.
31 суток	9300	Черапунджи, Индия	1–31 июля 1861 г.
2 месяца	12767	Черапунджи, Индия	июнь — июль 1861 г.
3 месяца	16369	Черапунджи, Индия	май — июль 1861 г.
4 месяца	18738	Черапунджи, Индия	апрель — июль 1861 г.
5 месяцев	20412	Черапунджи, Индия	апрель — август 1861 г.
6 месяцев	22454	Черапунджи, Индия	апрель — сентябрь 1861 г.
11 месяцев	22990	Черапунджи, Индия	январь — ноябрь 1861 г.
1 год	26461	Черапунджи, Индия	август 1860 — июль 1861 гг.
2 года	40768	Черапунджи, Индия	1860–1861 гг.

Пересмотрено: 29 ноября 1991 г., США СЗЮ; Бюро рекламаций США; Бюро метеорологии Австралии.

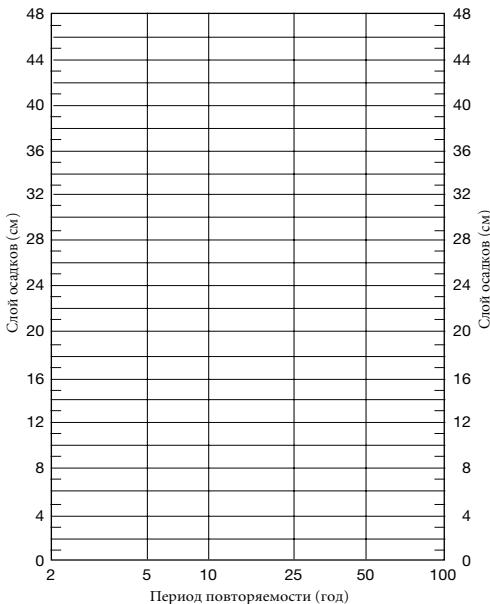


Рисунок 28.2 — График интерполяции периода повторяемости

Диагональ на рисунке 28.1 иллюстрирует пример, в котором при 24-часовом ливне слой осадков равен 73 мм, а при ливне в один час — 22 мм. Значения осадков иной продолжительности можно снять с графика на пересечении диагонали с вертикальными линиями, характеризующими различные продолжительности. Таким образом, при 12-часовом ливне слой осадков составит 60 миллиметров, а при 2-часовом — 30 миллиметров.

Графики, подобные изображенному на рисунке 28.2, можно построить для оценки осадков с периодами повторяемости от одного раза в 2 года до одного раза в 100 лет (с использованием интерполяции) [1, 7]. Такие графики должны основываться на хороших длительных рядах наблюдений на станциях, если они считаются надежными. Подобно графикам связи слоя осадков с их продолжительностью, они меняются от одного региона к другому в случае существенных изменений климатических условий. Они используются таким же образом, как и вышеупомянутые графики, т. е. на соответствующих вертикалях проводится диагональ через слои осадков, повторяемостью один раз в 2 года и один раз в 100 лет, а слои осадков другой повторяемости считаются в месте пересечения этой диагонали с соответствующей вертикалью.

При использовании вышеупомянутых двух типов интерполяционных графиков необходимо рассчитывать только часовые и 24-часовые осадки с периодом

повторяемости один раз в 2 года и один раз в 100 лет для большинства станций в регионе, для которого составляются эти графики. Затем эти графики используются для оценки других требуемых значений. Оба вида графиков подвержены региональным изменениям, поэтому следует соблюдать осторожность при использовании этих графиков не в тех регионах, для которых они были получены.

### 28.1.1.3 Максимальные наблюденные осадки

В приведенной ниже таблице представлены некоторые наибольшие значения наблюденных осадков различной продолжительности. Эти значения, близкие к вероятным максимальным величинам, аппроксимируются следующим приближенным уравнением [8]:

$$P = 422 T^{0,475} \quad (28.1)$$

где  $P$  — дождевые осадки, мм; а  $T$  — продолжительность, ч.

### 28.1.2 Распространение осадков по площади

Если площадь бассейна превышает  $25 \text{ км}^2$ , то для проектирования дренажных систем обычно недостаточно иметь данные наблюдений за осадками по одной станции, даже если она расположена в центре этого бассейна. Чтобы должным образом

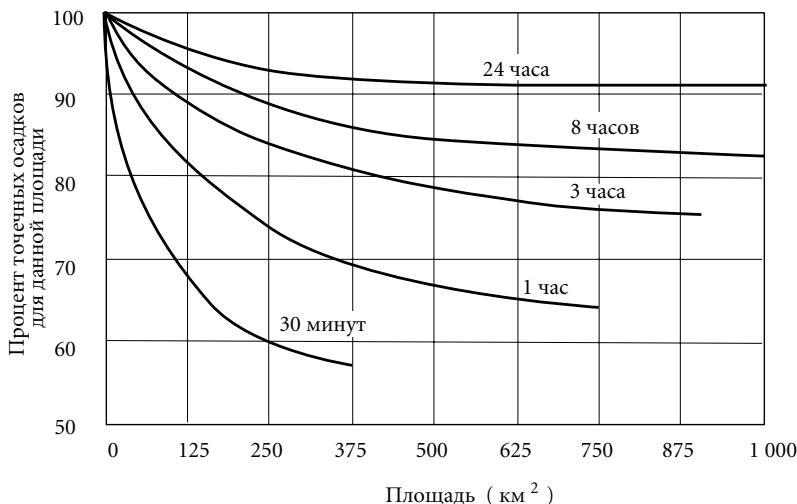


Рисунок 28.3 — Кривые зависимости слоя осадков от площади

учесть пространственно-временную изменчивость осадков, следует анализировать все данные об осадках в пределах данного водосбора и на прилегающей территории. Для больших площадей, для которых средний слой осадков значительно отличается от осадков в точке, можно построить график, подобный тому, который изображен на рисунке 28.3, и использовать его для приведения точечных осадков ко всей изучаемой площади. Чтобы показать, как используются значения осадков в точке на рисунке 28.3, предположим, что в определенном пункте имел место ливень продолжительностью в 6 часов и повторяемостью один раз в  $T$ -лет, за время которого выпал слой осадков, равный 63 миллиметрам. Для оценки среднего слоя осадков 6-часовой продолжительности для площади более  $250 \text{ км}^2$ , с тем же периодом повторяемости, в том же самом районе, величину в 63 миллиметра умножают на 89 % и получают 56 миллиметров. В то время как кривые на рисунке 28.3 используются для приведения к любому размеру площади, значения осадков в точке часто принимают без сокращения для площадей вплоть до  $25 \text{ км}^2$ .

### 28.1.3 *Обобщенные карты*

Даже длинный ряд наблюдений может оказаться относительно небольшой статистической выборкой по климатическому режиму. Поэтому лучшее представление о режиме в районе станции может дать слаженная карта, построенная с учетом данных о соседних станциях, т. е. по расширенной выборке. Степень слаживания должна соответствовать площади, охватываемой наблюдениями, погрешности измерений на станциях. Слишком слабое слаживание приведет к тому, что погрешность измерения может быть принята за мнимое региональное изменение хода осадков.

### 28.1.4 *Засуха*

Засуха представляет собой экстремальное гидрологическое явление, когда в результате нарушения гидрологического цикла в течение довольно длительного периода времени наблюдается дефицит воды. Местных водных ресурсов при этом не хватает для поддержания нормальной жизнедеятельности региона. Засухи рассматриваются и классифицируются как метеорологические, гидрологические или сельскохозяйственные. Метеоролог рассматривает засуху как период с осадками ниже нормы. Для гидролога засуха означает пониженное (ниже среднего) содержание воды в реках, водохранилищах, озерах, котловинах, водоносных слоях и в почве. Для специалиста в области сельского хозяйства засуха обычно ассоциируется с длительным недостатком воды в корнеобитаемой зоне.

Применительно к метеорологической засухе анализируется повторяемость засушливого периода. Простейшим видом анализа является сравнение суммарных дождевых осадков за календарные месяцы или соответствующие сезоны с нормой для возможной оценки суховости засухи, определенной по отрицательным отклонениям от нормы. Чтобы учсть эффект распределения ливня во времени, вместо

суммы осадков можно использовать индекс предшествующего увлажнения (раздел 33.2.1). Другим способом учета влияния ливней месяц за месяцем для оценки суровости метеорологической засухи является метод Хербста [9].

О суровости сельскохозяйственной засухи можно судить по индексу сухости, предложенному для обобщения и периодического распространения информации о засухе и условиях увлажнения сельскохозяйственных культур на региональной основе. Он может использоваться для оценки опасности засухи на значительной территории или для периодической оценки текущего состояния или степени суровости засухи по региону.

Суровость гидрологической засухи определяется по степени отклонения от нормы низкого стока (глава 35) и почвенной влаги (глава 38) в сочетании с сильным понижением уровня подземных вод.

## 28.2           Интенсивность дождевых осадков

### 28.2.1       Осадки в точке

Для построения кривых зависимости между интенсивностью выпадения дождевых осадков на станции и их продолжительностью желательно иметь большое число наблюдений за дождевыми осадками большой интенсивности в течение много-летнего периода, полученных по плювиографу подходящей конструкции (чтобы обеспечить точную оценку интенсивности ливней продолжительностью от 5 минут до 72 часов). Интенсивность ливней продолжительностью от одного до нескольких дней (скажем, трех дней) можно регистрировать осадкомерами с ежедневным снятием показаний. Измерения ливней продолжительностью до 72 часов с помощью плювиографов позволяют перекрывать данные суточных сетевых измерений при проведении статистических обобщений.

Средняя максимальная интенсивность осадков  $P_i$ , наблюдавшаяся в течение каждого ливня, может быть определена для каждой градации продолжительности  $T$ . При проектировании городских дренажных систем обычно представляют интерес ливни продолжительностью от 5–10 минут до нескольких часов. Для каждой избранной продолжительности среднюю интенсивность ливня  $P_i$  с периодом повторяемости раз в 1, 2, 5, ..., 100 лет можно определить по методикам, представленным в разделе 28.1.1.

Результаты анализа данных об интенсивности дождевых осадков по длительному ряду наблюдений можно обобщить в виде:

- a) семейства кривых для данной обеспеченности или периодов повторяемости, показывающих среднюю максимальную интенсивность ливней для каждой градации продолжительности;
- b) эмпирических формул, выражающих эти зависимости. В технической литературе описано большое количество таких формул, наиболее типичными из которых являются следующие:

$$P_i = \left( \frac{a}{b + T} \right), \quad (28.2)$$

$$P_i = a(T - b)^{-n}, \quad (28.3)$$

$$P_i = \frac{a + b \log T_r}{(1 + T)^n}, \quad (28.4)$$

где  $P_i$  обычно,  $\text{мм}\cdot\text{ч}^{-1}$ , представляет собой среднюю максимальную интенсивность дождевых осадков за время  $T$ ;  $T_r$  — период повторяемости;  $a$ ,  $b$  и  $n$  — параметры, различные для разных станций, а для определенной станции, изменяющиеся в зависимости от заданной величины повторяемости (или периода повторяемости). В некоторых странах, где был выполнен детальный анализ данных об интенсивности дождевых осадков, существуют карты изолиний параметров  $a$ ,  $b$  и  $n$ . Комплект таких карт очень удобен;

- c) в ряде публикаций [1, 7 и др.] в виде карт представлены результаты анализа частоты выпадения осадков для разных периодов их повторяемости и продолжительности (например: 10 лет, 24 часа). Интенсивность выпадения дождевых осадков можно определить по этим картам простым делением слоя осадков на продолжительность их выпадения.

Если для оценки интенсивности дождевых осадков на изучаемом водосборе принимается обобщенная эмпирическая зависимость, то следует, по возможности, изучить исходные данные, на основе которых она была получена. Зависимости такого типа иногда основаны на анализе небольшого количества данных, полученных по весьма ограниченной территории, и их применение для других районов может привести к ошибочным выводам.

При проектировании дренажных систем, с целью пропуска дождевых осадков со средней максимальной интенсивностью, важным фактором является также время сдвигки периода максимальной интенсивности осадков относительно начала ливня. Если этот период приходится на начало ливня, когда русла рек сухие или их водоносность низкая, пиковый расход будет снижен из-за высокой водопропускной способности русла. В этом случае будут необходимы незначительные дренажные работы для пропуска ливня указанной интенсивности по сравнению с теми, которые бы потребовались, если бы период максимальной интенсивности пришелся на середину или конец ливня.

Если анализ данных о дождевых осадках для станции показывает, что большинство периодов максимальной интенсивности осадков приходятся на начало, середину или на конец ливня, этот показатель следует учитывать при определении расчетного паводка. Если такая тенденция не обнаружена, то нет необходимости в сохранении полученной в результате наблюдений последовательности данных о интенсивности дождевых осадков при их использовании в математических моделях.

### 28.2.2 Распределение осадков по площади

При наличии кривых последовательных сумм ливневых осадков по нескольким станциям, оснащенным плювиографами и расположенным на территории бассейна или в пределах площади, охваченной ливнем, по данным отдельных станций можно получить сложную картину распределения осадков во времени для всего ливня или для его отдельных частей. Простейшим методом получения такого временного хода дождевых осадков (плювиограммы ливня) является наложение друг на друга плювиограмм отдельных станций. Ордината ливня по плювиографу за время  $t$  принимается как среднее из ординат различных кривых за это же время. Этот метод можно усовершенствовать путем умножения ординат плювиограмм каждой станции на соответствующий коэффициент, например на весовой коэффициент Тиссена. Если в бассейне установлено достаточно большое число плювиографов, кривые зависимости интенсивности от продолжительности для разных периодов повторяемости  $T_r$  можно получить для всего бассейна или его части.

### Список литературы

1. Pilgrim, D. H. and Canterford, R. P., (eds.), 1987: *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation*. Volumes I and II, The Institution of Engineers Australia, Canberra.
2. World Meteorological Organization, 1981: *Selection of Distribution Types for Extremes of Precipitation* (B. Sevruk and H. Geiger). Operational Hydrology Report No. 15, WMO-No. 560, Geneva.
3. Hershfield, D. M. and Wilson, W. T., 1957: *Generalizing of Rainfall-Intensity Frequency Data*. Extrait des comptes rendus et rapports, Assemblée générale de Toronto (Gentbrugge, 1958), Tome I, pp. 499-506.
4. Hershfield, D. M., Weiss, L. L. and Wilson, W. T., 1955: Synthesis of rainfall intensity regimes. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 81, Separate No. 744.
5. Hersfield, D. M., 1965: Method for estimating probable maximum rainfall. *Journal of the American Waterworks Association*, Vol. 57, August, pp. 965-972.
6. Court, A., 1961: Area-depth rainfall formulas. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 65, No. 6, June, pp. 1823-1831.
7. Miller, J. F., Frederick, R. H. and Tracy, R. J., 1973: *Precipitation Frequency Atlas of the Western United States*. NOAA Atlas 2, U.S. National Weather Service, 11 Volumes.
8. Paulhus, J. L. H., 1965: Indian Ocean and Taiwan rainfalls set new records. *Monthly Weather Review*, Vol. 93, May, pp. 331-335.
9. Herbst, P. H., Bredenkamp K. B. and Barker H. M. G., 1966: A technique for the evaluation of drought from rainfall data. *Journal of Hydrology*, Vol. IV, No. 3, pp. 264-272.



## ГЛАВА 29

### АНАЛИЗ ЛИВНЕВЫХ ОСАДКОВ

#### 29.1       **Общие положения**

Анализ ливневых осадков отражает характер зависимостей между продолжительностью, площадью выпадения и слоем дождевых осадков за конкретный ливень. Данные о слое осадков определяются для соответствующих сочетаний площади выпадения осадков и их продолжительности и представлены, как правило, в виде таблиц или кривых. В целом, такой анализ дает возможность получить ряды данных, полезных для проектирования водосливов и для исследований по прогнозированию количества осадков.

Данные наблюдений за осадками в отдельных точках анализируются в сочетании с другой информацией. Данные о дождевых осадках обычно представляют собой наблюденные суточные суммы осадков, дополненные наблюдениями по нескольким самописцам, которые содержат сведения об интенсивности кратковременных дождевых осадков. Иногда эти данные дополняются наблюдениями, полученными путем специального опроса, известного как «метод ведер» (раздел 21.8.2). Дополнительную информацию можно также получить по синоптическим картам погоды, данным радиолокаторов, сведениям о подъеме уровня воды в малых реках и из других источников. Методы, которые в обобщенном виде представлены ниже, подробно изложены в публикации ВМО *Manual for Depth-area-duration Analysis of Storm Precipitation* [1] (Наставление по анализу слоя, площади охвата и продолжительности ливневых осадков).

#### 29.2       **Интегральные кривые**

Первым шагом в изучении ливневых осадков является нанесение на график последовательно суммированных данных о дождевых осадках относительно времени суток (построение интегральной кривой) для каждой станции или для ряда выбранных репрезентативных станций, если их имеется достаточно большое число. Интегральные кривые для станций, не имеющих самописцев, строятся путем сравнения с интегральными кривыми по станциям с самописцами при помощи коэффициентов пропорциональности. При этом следует учитывать перемещение ливня, время его начала, окончания и наибольшей интенсивности. На рисунке 29.1 представлен типичный набор интегральных кривых для ливня, выпавшего с 31 марта по 2 апреля 1962 г. на юго-востоке Канады.

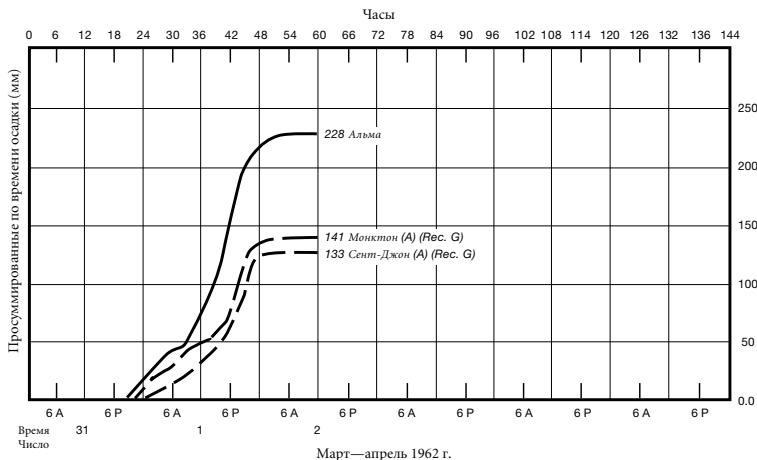


Рисунок 29.1 — Интегральные кривые дождевых осадков

Следующим этапом является составление таблиц с перечнем станций и указанием количества осадков, просуммированных за заданные интервалы времени. В представленном примере используются 6-часовые интервалы времени. Однако могут использоваться также и другие интервалы. Для удобства станции в таблице даны в порядке уменьшения суммарной величины ливневых осадков.

Следующим этапом является изучение этой таблицы и выбор 6-часового периода с максимальным приращением осадков. Затем за этот интервал выписываются величины осадков по другим станциям. Аналогичным образом выбирается 12-часовой интервал с максимальным ливнем и также выписываются величины осадков, выпавших в течение этого интервала. Такая же процедура применима и для 18-, 24-, ..., и  $n$ -часовых интервалов максимальной интенсивности. Для периодов, охватывающих несколько 6-часовых интервалов, может потребоваться значительное число попыток для выбора периода максимальных осадков заданной продолжительности.

### 29.3       Анализ зависимости между продолжительностью, площадью охвата и слоем осадков

На основе таблиц приращений максимальных дождевых осадков составляются карты изогиет для каждого интервала продолжительности (например: 6 часов, 12 часов). Затем оцениваются площади, прилегающие к каждой изогиете, с помощью планиметра или палетки и полученные значения наносятся на график относительно слоя осадков, после чего для каждой продолжительности строится плавная кривая. Как правило, слой осадков выражают в линейном масштабе, а площадь — в логарифмическом. Максимальные значения продолжительности осадков,

**Средний максимальный слой осадков (в миллиметрах)**  
**Ливень 31 марта — 2 апреля 1962 г., юго-восточная Канада**

<i>Площадь в км<sup>2</sup></i>	<i>Продолжительность в часах</i>				
	6	12	18	24	42
25	90	165	205	230	240
100	85	155	190	215	225
1 000	70	130	165	185	190
10 000	50	90	115	140	145
100 000	25	45	65	75	85

площади распространения и слоя осадков для каждого приращения площади и продолжительности, снятые с кривых, изображенных на рисунке 29.2, сводятся в таблицу, пример которой дан выше.

#### 29.4 Максимально возможные осадки (МВОС)

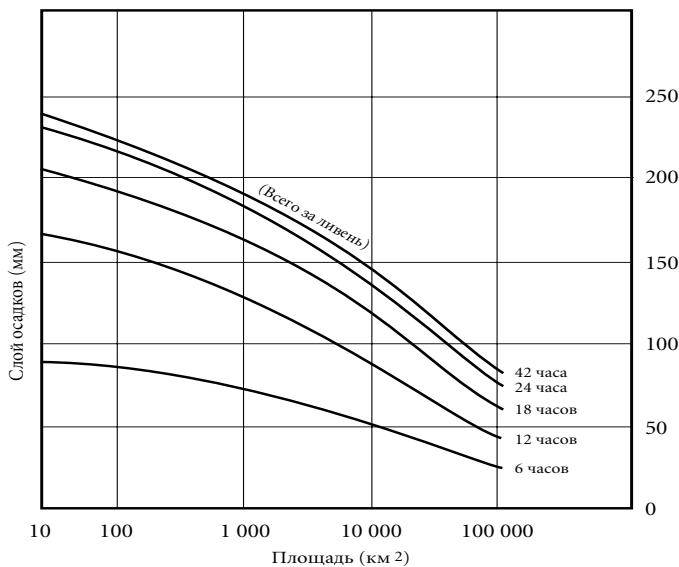
Понятие «максимально возможные осадки» хорошо известно и широко применяется, когда речь идет о количестве осадков, близком к верхнему физическому пределу для заданной их продолжительности в каком-либо отдельном бассейне. Понятия «максимально возможные осадки» и «экстремальные осадки» используются приблизительно в одинаковом значении. Вопрос о том, насколько эти осадки «близкие» и «возможные» — чисто риторический, поскольку определение возможного максимума есть однозначная задача, решаемая в зависимости от используемых данных.

##### 29.4.1 Методы расчета МВОС

Максимально возможные осадки для какого-либо речного бассейна можно определить с помощью моделей ливня или методом транспозиции и максимизации данных о ливнях [2, 3].

- a) Модели ливней: интенсивность осадков зависит от наличия атмосферной влаги и скорости превращения этой влаги в осадки. В США были предприняты попытки разработать модели ливней для теоретического расчета максимально возможных осадков. Эти исследования описаны в публикации BMO *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* [2] (Наставление по оценке максимально возможных осадков).

Основная трудность таких исследований состояла в учете влияния орографии на интенсивность выпадения осадков. Возникает эта трудность потому, что в границах отдельно взятого ливня ход осадков зависит не только от изменений в самом механизме выпадения осадков, но и от орографии. Чтобы определить



Репрезентативная конвективная точка росы ..... 18 °C .....

Удаленность репрезентативной конвективной точки росы от центра сильных осадков ..... 1 400 km, 0700 LST, 1-е апреля .....

Плотность водомеров ( $\text{км}^2/\text{водомер}$ ) по конкретной изогисте в м: 200-61; 175-364; 150-1 061; 125-621; 100-647; 75-796; 50-851

Количество водомеров ..... четыре .....

Масштаб рабочей карты изогист ..... 1 : 2 488 681 .....

Примечания .....

Рисунок 29.2 — Огибающие кривые зависимости слоя осадков, площади их выпадения и продолжительности

максимально возможные осадки с помощью модели ливня, верхние пределы влажности и ветра (для разных уровней в слое атмосферы, толщина которого является функцией характеристик модели), оцениваются и обрабатываются с помощью модели. Во многих регионах слишком короткие ряды наблюдений и/или скучность данных наблюдений за ветром и влажностью в верхних слоях атмосферы усложняют оценку предельных значений.

- b) Максимизация и транспозиция данных о ливнях: более общим подходом в оценке максимально возможных осадков является максимизация наблюденных

данных о ливневых осадках [2]. Как правило, максимизация данных о ливнях основана на следующих двух предпосылках:

- i) осадки можно представить как результат наличия влаги и совместного эффекта воздействия циклона и возникающего ветра;
- ii) наиболее эффективное сочетание воздействия циклона и возникающего ветра может быть определено на основании данных о выдающихся ливнях по самописцам. Вторая предпосылка часто требует транспозиции данных о ливне, т. е. переноса данных о каком-либо выдающемся ливне с территории выпадения этого ливня на изучаемый бассейн в пределах одного и того же метеорологически однородного региона.

Максимизация наблюденных ливневых осадков для определения максимального возможных осадков включает в себя корректировку количества влаги, исходя из предположения, что при максимальном количестве поступившей влаги ливень даст максимальное количество осадков. Этот широко известный метод корректировки влаги включает оценку содержания влаги в воздушной массе (в виде дождевых осадков) по данным наземных наблюдений за точкой росы у поверхности земли; описание этого метода изложено в [2]. Чтобы перенести данные о максимальном запасе влаги на изучаемый водосбор, некоторые исследователи проводят дальнейшее приведение данных о ливневых осадках к расчетному максимальному устойчивому ветру, если требуется очень большой запас прочности при проектировании, или количество данных о ливневых осадках ограничено.

#### 29.4.2 *Предварительные оценки*

При строительстве крупных гидротехнических сооружений стоимость водосливной плотины может составлять существенную часть стоимости всего проекта. Поэтому правильный расчет ее размеров чрезвычайно важен и оправдывает проведение очень детальных исследований. На предварительной стадии проектирования, однако, достаточно использовать обобщенные оценки максимально возможных осадков, если таковые имеются для данной территории. Оценки такого типа для территории США опубликованы в виде карт и графиков в различных выпусках серии гидрометеорологических докладов Бюро погоды США. Аналогичные отчеты были подготовлены и некоторыми другими странами для различных регионов мира.

#### 29.4.3 *Выбор расчетной продолжительности дождевых осадков*

До тех пор пока в пределах зоны распространения ливня не произведен анализ зависимости между продолжительностью ливня, площадью охвата и слоем осадков для изучаемого бассейна, необходимо провести исследования отдельных ливней, чтобы получить оценки максимально возможных осадков. Прежде чем приступить к таким исследованиям, следует определить вероятные критические продолжительности ливней (ливня) для данной расчетной задачи. Выбор соответствующей

приблизительной расчетной продолжительности ливня поможет избежать анализа данных, который не является необходимым для данного проекта или устраниТЬ необходимость анализа дополнительных данных, если первоначально была выбрана слишком малая продолжительность осадков.

При выборе приблизительной расчетной продолжительности ливня следует учитывать приблизительное время подъема на гидрографе паводков для ливней, выпадающих в разных частях бассейна, а также отдельные технические особенности и предлагаемый режим эксплуатации проектируемого сооружения.

#### 29.4.4 *Выбор бассейнов притоков*

При проектировании сооружений в створах, замыкающих крупные водосборы, может потребоваться проведение оценки максимально возможных осадков для некоторых бассейнов притоков с последующим составлением результирующих гидрографов вероятных максимальных паводков, формирующихся в этих бассейнах. Эти бассейны притоков, по которым требуется построение паводочных гидрографов, должны быть выбраны до начала анализа ливней, чтобы избежать последующего ненужного или неполного анализа средних по площади величин слоя дождевых осадков при изучении ливней. Выбор этих бассейнов производится с учетом физико-географических характеристик бассейна, а также наличия и размещения гидрометрических станций, по данным которых может быть выполнена трансформация паводочных гидрографов, полученных для бассейнов притоков, в створ проектируемого сооружения.

#### 29.4.5 *Транспозиция данных о ливнях*

Ограничения, связанные с короткими рядами наблюдений за дождевыми осадками в изучаемом бассейне, можно свести к минимуму путем изучения значительных ливней, имевших место в пределах окружающего метеорологически однородного региона. При транспозиции данных о ливнях возникают три основные проблемы:

- a) определение метеорологически однородного региона, частью которого является изучаемый бассейн;
- b) корректировка метеорологических факторов, влияющих на формирование ливневых осадков, учитывающих климатические и ландшафтные различия между местом выпадения ливней и изучаемым бассейном;
- c) определение допустимых изменений в ориентации хода изогибов ливня при их переносе на другой бассейн.

Первым шагом в любом исследовании является выбор тех ливней, данные по которым можно перенести на изучаемую территорию. При определении допустимых пространственных границ для переноса данных об отдельных ливнях следует учитывать следующие факторы:

- a) источники влаги и преграды при ее перемещении к месту выпадения ливня;
- b) доступность источника влаги и относительная высота преград для поступающей влаги в пределах намеченной транспозиционной зоны;
- c) наличие в прошлом аналогичных синоптических условий в пределах намеченной зоны транспозиции, сходных с условиями, наблюдавшимися во время выпадения изучаемого ливня по таким параметрам, как содержание атмосферной влаги, устойчивость, направление и скорость ветра у поверхности земли и на разных высотных уровнях, продолжительность заданной интенсивности выпадения ливня, направление и скорость движения центров низкого давления у поверхности и на разных высотных уровнях.

Следует иметь в виду, что один и тот же ливень необязательно должен иметь одинаковую вероятность выпадения на всех участках зоны транспозиции. Конечно, можно предположить, что определенные атмосферные процессы физически возможны во всей зоне, однако более вероятно, что повторяемость ливня может быть более высокой на одних участках и более низкой — на других. Кроме того, все ливни, выпадающие на какой-либо отдельной географической территории, необязательно будут иметь общую зону транспозиции. Детальное изучение синоптических параметров каждого ливня необходимо для определения соответствующей ему транспозиции.

Большое влияние на распределение осадков в горных районах оказывает орография местности. Транспозиция ливней в таких районах должна ограничиваться территориями со сходным орографическим воздействием, за исключением тех случаев, когда изучение синоптических характеристик ливня и его распределения по территории свидетельствует о том, что влияние орографии незначительно. В последнее время достигнуты некоторые успехи [4, 5] в области анализа и оценки влияния орографии, которые можно использовать при транспозиции и синтезе ливня.

#### 29.4.6 *Выбор и анализ наиболее сильных ливней*

При выборе ливней для их анализа, во-первых, необходимо определить метеорологически однородный регион, частью которого является изучаемый бассейн, а затем рассмотреть данные осадкомерных станций в пределах этого региона, чтобы выбрать даты выпадения наиболее сильных ливней.

Если в пределах региона немного осадкомерных станций, необходимо рассмотреть данные по каждой из этих станций. В районах с довольно густой плотностью сети станции необходимо выбирать на таком расстоянии друг от друга, чтобы сильные, но ограниченные по площади осадки (например вследствие интенсивных, но кратко-временных гроз), не были учтены, а все наиболее значительные ливни, охватывающие территорию изучаемого бассейна, были выявлены. Обычно удается довольно быстро выявить такие ливни в пределах района, во время которых наблюдалось 8–10 случаев максимальных дождей на территориях, близких по размерам к изучаемому бассейну.

Затем рассматриваются синоптические характеристики каждого такого ливня для определения возможности сделать транспозицию этого ливня в отношении изучаемого бассейна. Далее выполняется анализ зависимости между продолжительностью выпадения осадков, площадью охвата и слоем осадков для тех ливней, которые используются для транспозиции, следуя методике, описанной в разделах 29.2 и 29.3, а также в [2].

Желательно выполнение полного анализа зависимости слоя осадков, площади их распространения и продолжительности выпадения по каждому ливню с целью использования полученных данных в будущем. Однако, при необходимости, анализ ливня большой продолжительности можно ограничить лишь анализом той его части, которая дает максимальный слой осадков для площади, равной размеру изучаемого бассейна, и в течение интервала времени, равного расчетной продолжительности ливня (раздел 29.3).

#### **29.4.7        Максимизация выбранных ливней**

Целью максимизации ливней является оценка (в процентах) того, насколько увеличится слой осадков за данный ливень, если метеорологические характеристики этого ливня достигнут своего расчетного верхнего физического предела. Методы максимизации, разработанные в США и принятые в ряде стран [5], описаны Вейснером в *Hydrometeorology* [3] (Гидрометеорология) и в ряде публикаций Национальной службы погоды (бывшего Бюро погоды) США (см. ссылки в [2]). Выбранные для исследования наиболее сильные ливни максимизируются в соответствии с этими методами. Затем на основе различных величин максимизированных слоев ливневых осадков можно определить наибольший слой осадков для любой заданной продолжительности ливня для исследуемого бассейна или для выбранных бассейнов притоков.

#### **29.4.8        Распределение ливневых осадков по территории**

Распределение ливневых осадков по бассейну может оказать большое влияние на вызванный ими паводок. При оценке вероятного максимального паводка возникает вопрос о допустимости изменений хода изогиет, полученного по данным об исторических ливнях на изучаемой территории и ливней, перенесенных на этот бассейн методом транспозиции.

На практике обычно предполагается, что значительные изменения в ходе изогиет указывают на существенные изменения в направлении движения ливня, направлении ветра, а также в изменении целого ряда атмосферных условий, которые приводят к выпадению ливня. Незначительные изменения в ходе изолиний вполне допустимы; в некоторых странах, например, максимально допустимое изменение в ориентации изолиний принято  $20^{\circ}$ . Необходимость учета распределения осадков относительно ориентации бассейна привела к необходимости проведения специальных исследований [2, 6].

#### 29.4.9 *Региональная совместимость оценок*

Окончательные оценки максимально возможных осадков для изучаемого бассейна следует сравнить с аналогичными оценками по другим бассейнам в пределах одной и той же метеорологически однородной зоны. При отсутствии совместимости эти оценки следует пересмотреть, если эту несовместимость нельзя объяснить различием орографических характеристик, условий поступления влаги и т. д. Приемы проверки на региональную совместимость, включающей различные сопоставления, описаны Хансеном и др. в *Hydrometeorological Report* [7] (Гидрометеорологический отчет) и в [2].

#### 29.4.10 *Методы расчета при отсутствии данных*

При отсутствии метеорологических данных или данных о стоке, обобщенные оценки должны быть получены методом аналогии, принимая в качестве аналогов максимально возможные осадки в сходных по климатическим условиям регионах, по которым имеются данные наблюдений. Такие обобщенные оценки можно делать с достаточной степенью надежности для равнинной территории. Однако большинство средних и крупных плотин расположено в регионах, где на величину дождевых осадков оказывает влияние изменение высоты и другие факторы рельефа. Транспозиция оценок в такие регионы из любых других является менее надежной, что свидетельствует о необходимости организации метеорологических и гидрометеорологических измерений так скоро, как возможно в самом бассейне, где реализуется проект, и поблизости от него.

Если имеются данные наблюдений за суточными осадками по отдельным станциям, а данные наблюдений за влажностью воздуха и другим параметрам, необходимым для максимизации ливня, отсутствуют, то с помощью статистического метода, разработанного Хершфильдом [8, 9], можно получить приближенные оценки максимально возможных осадков для малых площадей, освещенных наблюдениями только одной станции (например до 1 000 км<sup>2</sup>). Максимальные дождевые осадки определенной продолжительности (или заданных продолжительностей) за каждый год наблюдений используются для составления годовых рядов (разделы 27.2 и 28.1.1). Затем рассчитываются среднее значение ряда  $\bar{P}$  и стандартное отклонение  $S_p$ ; среднее значение используется для получения коэффициента  $K$  (см. рисунок 29.3), а затем рассчитывается величина вероятных максимальных осадков по уравнению

$$PMP = \bar{P} + K S_p. \quad (29.1)$$

Следует обратить внимание на то, чтобы одна или две максимальные величины в ряду годовых величин были сопоставимы с другими, входящими в ряд величинами. Если, например, максимальная величина за 30-летний период вдвое превосходит вторую наивысшую величину, то она явно не соответствует данному

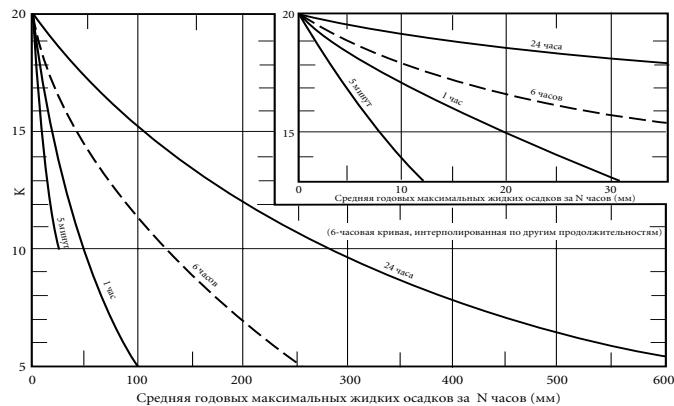


Рисунок 29.3 — Коэффициент  $K$  как функция продолжительности и соответствующего ей среднего годового максимума осадков

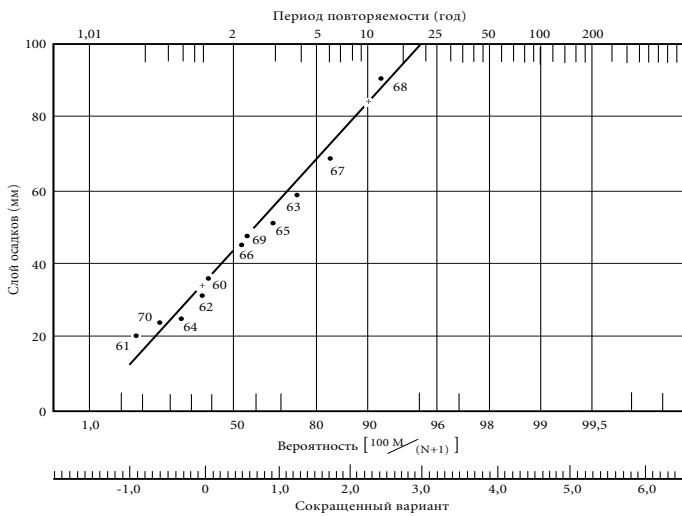


Рисунок 29.4 — Пример графика вероятности экстремальных значений осадков

ряду и является «отскакивающей» величиной. Простейшим способом выявления такой «отскакивающей» величины является ранжирование ряда в убывающем порядке с последующим вычислением периода повторяемости (раздел 27.2) каждого значения. Затем все значения наносятся на клетчатку вероятностей относительно периодов их повторяемости, как показано на рисунке 29.4. Если максимальное значение ряда лежит намного выше линии, соответствующей другим членам ряда, такую величину следует рассматривать как «отскакивающую». При расчете среднего значения ряда или стандартного отклонения она отбрасывается. Если же ее использовать, то в среднее значение и стандартное отклонение должны быть введены поправки, как это предлагает Хершфильд [8], который также разработал способ удлинения рядов. В главе 4 в [2] дается полное, детальное описание всей методики, включая графики получения необходимых поправок.

Когда полученное для пункта значение максимально возможных осадков необходимо использовать для площади более  $25 \text{ км}^2$ , его следует уменьшить. Для меньших размеров площадей в этом нет необходимости. Для больших площадей точечные значения осадков обычно уменьшают, пользуясь кривыми зависимости слоя осадков от площади их выпадения или кривыми редукции осадков по площади, аналогичными кривым на рисунке 28.3.

Описанный статистический метод может привести к завышению вероятных максимальных осадков в регионах с сильными ливнями и в регионах, где часто повторяются ливни сходного характера. В регионах с незначительными осадками и в регионах, где возможны хотя и редкие, но все же сильные ливни, порождающие выпадение сильных дождевых осадков вследствие, например, ураганов, этот метод может привести к занижению максимально возможных осадков. Было установлено, что для того чтобы получить более высокие значения максимальных осадков для некоторых регионов по сравнению с определенными на основании точечных наблюдений, значения коэффициента  $K$  должны равняться 30. В США и в ряде других стран, где для определения МВОС используются, как правило, данные наблюдений, статистический метод применяется, главным образом как средство проверки.

### Список литературы

1. World Meteorological Organization, 1969: *Manual for Depth-area-duration Analysis of Storm Precipitation*. WMO-No. 237, Geneva.
2. World Meteorological Organization, 1986: *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*. Operational Hydrology Report No. 1, WMO-No. 332, Geneva.
3. Weisner, C. J., 1970: *Hydrometeorology*. Chapman & Hall, London.
4. U.S. Weather Bureau, 1976: *Hydrometeorology*. Reports 55A, 56, and 57.

5. Kennedy, M. R., Pearce, H. J., Canterford, R. P. and Mintz, L. J., 1988: The estimation of generalized probable maximum precipitation in Australia. Workshop on spillway design floods, Canberra, 4 February 1988, *Australian National Committee on Large Dams Bulletin*, Issue 79, April 1988.
6. Hansen, E. M., Schreiner, L. C. and Miller, J. F., 1982: Application of probable maximum precipitation estimates: United States east of the 105th meridian. *Hydrometeorological Report*, No. 52, U.S. National Weather Service.
7. Hansen, E. M., Schwarz, F. K. and Riedel, J. T., 1977: Probable maximum precipitation estimates: Colorado river and Great Basin drainages. *Hydrometeorological Report*, No. 49. U.S. National Weather Service.
8. Hershfield, D. M., 1961: Estimating the probable maximum precipitation. *Journal of the Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 87, September, pp. 99-116.
9. Hershfield, D. M., 1965: Method for estimating probable maximum rainfall. *Journal of the American Waterworks Association*, Vol. 57, August, pp. 965-972.

## ГЛАВА 30

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ОБ ОСАДКАХ

#### 30.1       **Общие положения**

Интерпретация данных об осадках имеет две основные цели. Одна цель — оценка данных наблюдений, полученных на основании одного или серии измерений. Оценка наблюденной выборки включает рассмотрение внешних воздействий, таких, как неудачная или неустойчивая установка осадкомера и интерпретацию воздействия окружающей среды, например физико-географических факторов.

Вторая цель — описание явления в форме, удобной для представления, последующего анализа и прочих применений. Примерами могут служить: выражение ливня в размерностях слоя, времени и пространства; представление данных в табличной, графической или алгебраической форме; и отражение разнообразия ливней в виде повторяемости.

#### 30.2       **Корректировка данных**

Все измерения представляют собой выборки элементов, которые изменяются во времени и в пространстве. Например, измерения стока проводятся дискретно и в отдельных точках поперечного сечения реки. Даже погодный метеорологический радиолокатор, который интегрирует по площади, фиксирует дождевые капли в пространстве узкого врачающегося луча с прерывистыми импульсами. Для того чтобы измерения были полезными для практической гидрологии, они должны быть представительными или переносимыми на большие площади и периоды большой продолжительности. Чтобы получить однородные данные различных измерений, необходимо введение поправок. Эти поправки не должны, однако, нарушать единства измерений.

Процедура введения поправок, как правило, преследует три цели. Первая цель — сделать данные однородными в заданных условиях, как например, при стандартном режиме; примером может служить приведение данных измерений к стандартной высоте установки прибора. Вторая цель — устранение или снижение воздействия внешних факторов. Примером может служить анализ двойной интегральной кривой, который может быть использован для корректировки данных вследствие изменений в расположении осадкомера или его ориентации. Третья цель — формулирование выводов или обобщение данных для их представления потребителям или

изучения. Этот процесс является по своей сути избирательным. Примером может служить карта сглаженных изогиет. Другой пример — линия регрессии, которая характеризует усредненную зависимость вместо сложных графиков с рассеянными точками. Тарировочные кривые преследуют последние две цели.

### 30.2.1 Стандартный период наблюдений

При региональном обобщении гидрологических данных, например среднегодовых осадков, часто возникает проблема из-за того, что периоды наблюдений на станциях различны. Одна станция могла функционировать в период выпадения интенсивных осадков, в то время как на другой станции наблюдениями был охвачен особо маловодный период. Попытки сравнения данных этих двух станций, например при составлении карт среднегодовых изогиет, приведут к смешению изменчивости в пространстве с изменчивостью во времени.

График в виде полос, представленный на рисунке 30.1, который отражает периоды наблюдений нескольких станций в одном масштабе времени, может помочь в решении этой проблемы. По графику сравнительно легко можно выбрать оптимальный период наблюдений. Например, на рисунке 30.1 период между 1913 и 1950 гг. можно выбрать в качестве оптимального для данного пространственного распределения осадков. Если имеются пропуски в наблюдениях по станциям за этот период, подсчеты можно произвести посредством корреляции данных за ту часть периода, которая является общей с другими станциями, используя полученную взаимосвязь для оценки величин осадков за те годы, когда в наблюдениях имелись пропуски.

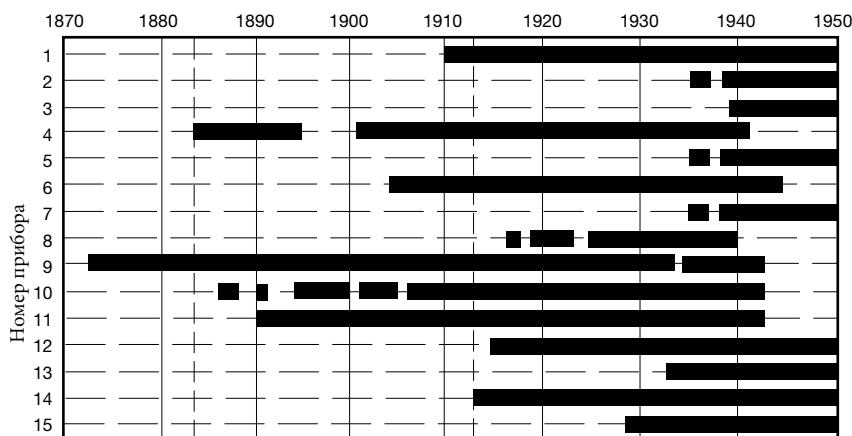


Рисунок 30.1 — Совмещенный график продолжительности наблюдений на станциях

Выбранный оптимальный период должен быть достаточно продолжительным, для того чтобы получить хорошую выборку данных во времени. Если этот период будет слишком длинным, потребуется излишне большая обработка данных. Если же период окажется слишком коротким, выборка будет недостаточной для учета изменчивости во времени и может зависеть от слишком маловодных или многоводных периодов.

### 30.2.2      *Анализ по кривой связи двух последовательностей (двойная интегральная кривая)*

Анализ по кривой связи двух последовательностей представляет собой графический метод обнаружения и корректировки противоречивых данных наблюдений путем сравнения временных последовательностей данных по изучаемой станции и другим станциям. Накопленные годовые или сезонные данные по изучаемой станции наносятся на график относительно данных ближайшей станции или группы станций с надежными наблюдениями. Изменение наклона кривой может явиться результатом изменения ориентации или установки осадкомера, изменений методики сбора и обработки данных и т. д. Пример анализа с помощью такой кривой для выявления изменений в установке осадкомера показан на рисунке 30.2, где

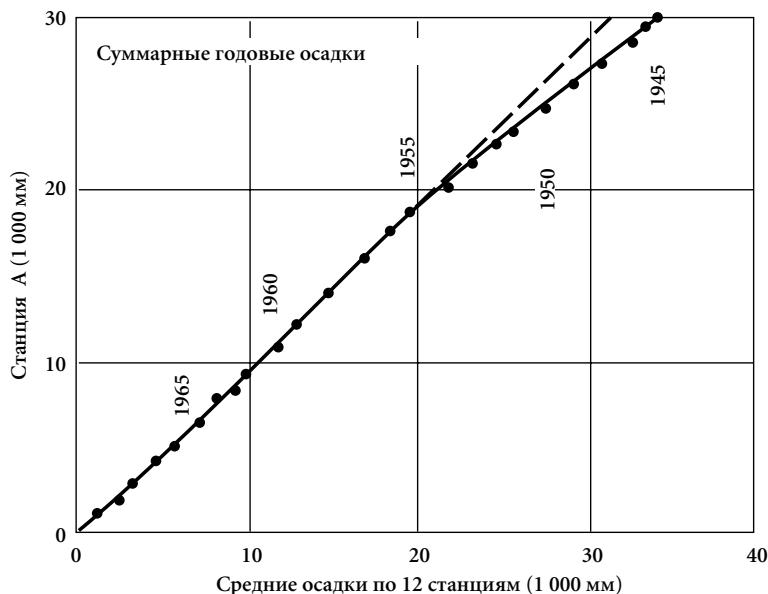


Рисунок 30.2 — Анализ двойной интегральной кривой

данные этой гипотетической станции сравниваются с относительно стабильными усредненными данными нескольких близлежащих станций. Из рассмотрения кривой на рисунке 30.2 можно видеть, что линия связи годовых осадков по станции А с усредненными значениями осадков по 12 станциям очень резко изменилась в 1955 году; наклон кривой изменился с 0,95 до 1955 года до 0,75 после 1955 года. Чтобы компенсировать какое-то изменение, происшедшее на станции А, данные до 1955 г. необходимо откорректировать по соотношению 0,75 к 0,95.

Когда анализ кривой связи показывает перелом в ходе этой кривой, то введением поправок, выраженных в виде отношения наклонов кривой, достигается одновременно несколько целей. В частности, такое обнаружение служит началом исследования для выявления причины изменения хода кривой. Нанесенные на график точки при анализе кривой связи обычно отклоняются от прямых линий, проведенных в поле этих точек. Точки можно приблизить к прямой путем изменений наклона кривой за периоды лишь в несколько лет. Однако следует признать, что такие кратковременные изменения в наклоне кривой могут быть случайными, и ни один отрезок прямой нельзя считать надежным, если на нем имеется менее пяти точек. Обычно изменение хода кривой принимается реальным, если оно подкреплено другими факторами или надежно установлено за длительный период времени.

На рисунке 30.2 пример анализа кривой связи двух последовательностей представляет собой всего лишь один из множества случаев применения такого анализа. Нанесение на график связи показателя суммарных годовых или сезонных осадков относительно соответствующего суммарного годового или сезонного стока может выявить временные тренды в данной зависимости. С помощью анализа кривой связи эти тренды могут быть объяснены забором воды из реки или изменениями в землепользовании и вычислены (нанесение на график суммарного стока с одного бассейна относительно суммарного стока с соседнего бассейна часто выявляет прогрессирующее или внезапное изменения в режиме стока или в характеристиках русла [4]). Для анализа кривой связи разработаны методы с использованием ЭВМ [2].

### 30.2.3 Расчет недостающих данных

При подготовке данных для анализа некоторые ряды оказываются неполными. Для заполнения пропусков во временных рядах или пустых пятен на карте, недостающие данные можно рассчитать с помощью таких методов, как интерполяция данных за одновременный период по соседним станциям. Методика такой интерполяции изложена в учебниках по гидрологии и в публикациях ВМО [1,3,5]. Чтобы решить, сколько пропущенных данных может быть рассчитано, необходимо сделать соответствующее обоснование. Если расчет выполняется для заполнения нескольких пробелов, то большим

количеством данных наблюдений можно пренебречь. Если же расчет выполняется для восстановления слишком большого числа пропусков, информационное поле может оказаться нерепрезентативным при интерполяции. Восстановление более 5–10 процентов пропусков вряд ли оправдано.

### 30.3        **Распределение по площади**

#### 30.3.1        **Применение карт изогиет**

Местоположение станций и величины осадков за соответствующие периоды наносят на карту подходящего масштаба, после чего на ней проводят линии равных значений осадков. Типичные периоды времени, для которых составляются карты, — часы, сутки, месяцы, общая продолжительность ливня, сезон, год. Кроме того, составляются карты для среднемесячных, среднегодовых или средних за сезон значений осадков.

В районах, где влияние на осадки физико-географических факторов невелико или полностью отсутствует, проведение изогиет представляет собой простой процесс интерполяции, при котором степень слаженности контуров и профилей, проведенных на карте, соотносится с расстоянием между станциями, с качеством и изменчивостью данных. Однако в случае значительных погрешностей при измерении осадков, плотность расположения осадкомеров играет важную роль при анализе данных для картирования [6].

В районах, где на осадки влияют рельеф местности или крупные водоемы, необходимо проводить оценку соответствующих физико-географических параметров (раздел 30.3.2). Вычисляются следующие параметры: высота местности, расстояние от берега, уклон, а также экспозиция по отношению к влагонесущим ветрам. Для составления карт изогиет рекомендуется разрабатывать и применять объективные методы, в которых точно определенные физико-географические параметры соотносятся с количеством осадков при помощи регрессионного анализа. Имеются многочисленные подобные методы, реализованные на ЭВМ [6].

#### 30.3.2        **Оценка физико-географических факторов**

На атмосферную циркуляцию, выпадение ливней и количество осадков большое влияние оказывают горы и другие физико-географические особенности. Оценка влияния физико-географических особенностей на отдельные ливни затруднена вследствие недостаточности данных о векторах ветра, устойчивости и прочих характеристик ливня, а также из-за значительной изменчивости характеристик ливня. Диапазон изменений по площади отдельных ливней в горных районах можно выразить через отношение количества ливневых осадков к среднему сезонному или годовому их количеству при условии, что ливни относились к преобладающему типу при определении средних значений.

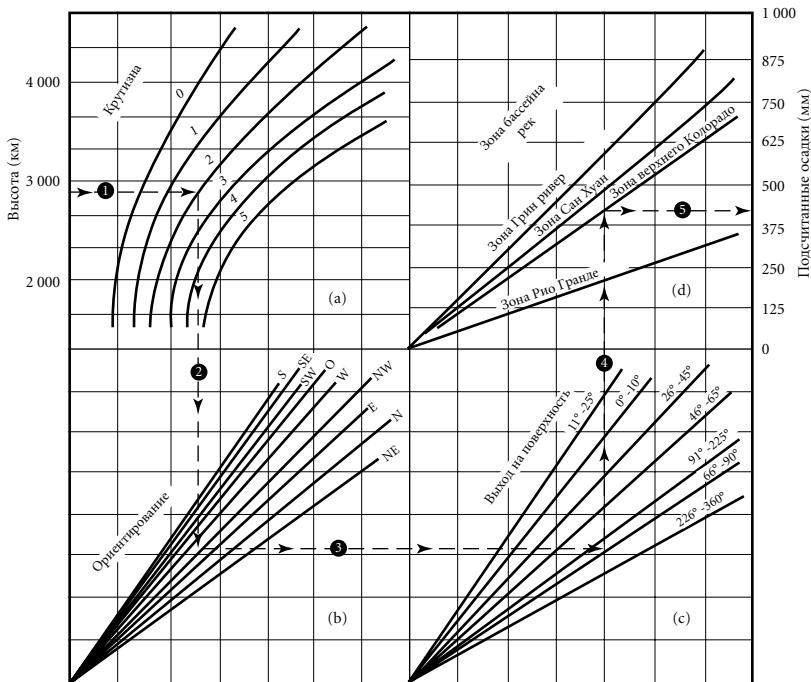


Рисунок 30.3 — Зависимость между средними осадками за период октября—апрель и топографическими характеристиками запада Колорадо

Давно было установлено и на протяжении многих лет изучалось изменение средних годовых осадков в зависимости от высоты и ориентации склонов. К дополнительным параметрам относятся крутизна склона и степень открытости. Степень открытости можно определить объективно, например, как сумму секторов круга с радиусом в 30 км вокруг станции, в которых не имеется препятствий выше 0,3 км над постройками станции. Учет крутизны склона требует предварительного установления масштаба или длины рассматриваемого склона (раздел 40.5.1).

Используя графическую корреляцию, можно определить параметры и их связь со среднегодовыми или средне-сезонными осадками путем последовательного приближения. На рисунке 30.3 приведен пример такого процесса. Методика корреляционного анализа изложена в работах Линслея и др. *Applied Hydrology* [7] (Прикладная гидрология) и в *Hydrology for Engineers* [8] (Гидрология для инженеров), а также в работе Рейнберда *Methods of Estimating Areal Average Precipitation* [9] (Методы оценок средних по площади осадков).

### 30.4 Расчет средних по площади осадков

При оценке среднего количества осадков для какой-либо площади обычно используются несколько методов [7]. При выборе метода необходимо учитывать качество и характер имеющихся данных, а также требуемую точность результатов.

#### 30.4.1 Среднее арифметическое

Вычисление среднего арифметического из количества осадков, наблюденных на станциях в бассейне, представляет собой простейший объективный расчет среднего количества осадков для водосбора. Этот метод пригоден для бассейнов с большим числом осадкомерных станций, которые, вследствие равномерного распределения по площади или по другим причинам, адекватно отражают распределение осадков по площади водосбора. Такая адекватность может быть проверена путем сравнения с результатами, полученными при применении более сложных методов в тех же условиях.

#### 30.4.2 Метод многоугольников

Метод многоугольников, во многих учебниках называемый методом Тиссена [7, 10], проиллюстрирован на рисунке 30.4. Он используется при неравномерном распределении осадкомерных станций на водосборе и заключается в том, что данным, полученным от каждой станции, придается вес, пропорциональный расстоянию между станциями. Для этого на карте проводятся линии, соединяющие соседние станции. Перпендикуляры, разделяющие эти линии пополам, образуют сеть многоугольников с одной станцией в каждом многоугольнике. Площадь, к которой тяготеет каждая такая станция, есть площадь многоугольника, которая используется как показатель веса осадкомерной станции.

Чтобы получить средние осадки для бассейна, сумма произведений площади каждой станции на величину осадков делится на общую площадь бассейна. Там, где части многоугольников выходят за пределы границ водосбора, используется только та часть многоугольника, которая попадает внутрь площади водосбора. Таким образом, станции, находящиеся рядом с водосбором, но за его пределами, могут иметь многоугольник, часть которого находится в пределах водосбора; поэтому данные такой станции также включаются в расчеты.

Эта процедура является чисто механической и может выполняться с помощью вычислительных машин. Какое-либо изменение на сети, связанное с закрытием старой или открытием новой станции, требует пересчета весовых коэффициентов. При отсутствии данных по одной или нескольким станциям за отдельный день или период ливня, проще рассчитать эти недостающие величины, чем пересчитывать веса станций. Расчет можно выполнить путем интерполяции между станциями или путем построения изогиет (раздел 30.2.3).

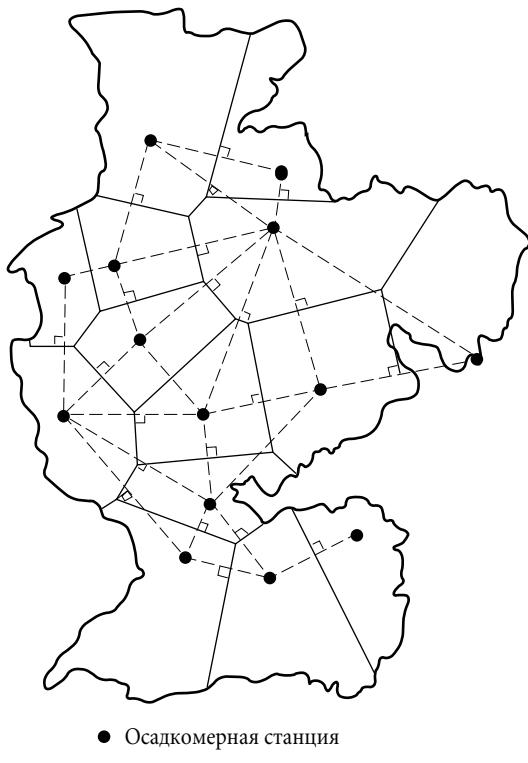


Рисунок 30.4 — Метод многоугольников

Преимуществом метода является его недостаток, заключающийся в том, что не учитывается любая другая информация, кроме расстояния между станциями и количества осадков.

#### 30.4.3      *Метод изогиет*

Метод изогиет основан на учете площадей между двумя соседними изогиетами (раздел 30.3.1). Эти площади можно определить путем планиметрирования или наложения прозрачной палетки на карту изогиет с подсчетом числа квадратов на палетке в пределах каждого интервала между изогиетами. Рутинный анализ часто заменяется применением вычислительной техники [5].

Метод изогиет позволяет специалисту, проводящему анализ, использовать всю имеющуюся информацию. Такая информация может включать: использование радиолокаторов, физико-географические зависимости, ход, сведения о путях происхождения и характере ливня и данные о стоке. Умелое использование этого

метода обеспечивает хорошие результаты. Имеются различные подходы, основанные на использовании вычислительной техники, и методы пространственного обобщения, позволяющие реализовать метод изогиет [5].

#### 30.4.4 Метод процентов от нормы

Для горных областей многих регионов мира составлены карты среднегодовых и средних сезонных осадков с учетом усредненного влияния на осадки физико-географических факторов. При использовании этого метода ливневые осадки выражаются в процентах от среднегодовых или средних сезонных осадков, а для построения карт изогиет используются карты «изопроцентов». Этот метод наиболее успешно применяется в регионах с ярко выраженным влиянием физико-географических факторов, где в связи с этим отдельные ливни имеют сходные очертания изогиет.

#### 30.4.5 Гипсометрический метод

Гипсометрический метод, представленный на рисунке 30.5, особенно пригоден для горных районов. Гипсографическая кривая в квадранте (a) строится путем нанесения на график площадей бассейна, расположенных ниже различных горизонталей ( $A'$  на оси  $x$ ), относительно высот этих горизонталей ( $z$  на оси  $y$ ).

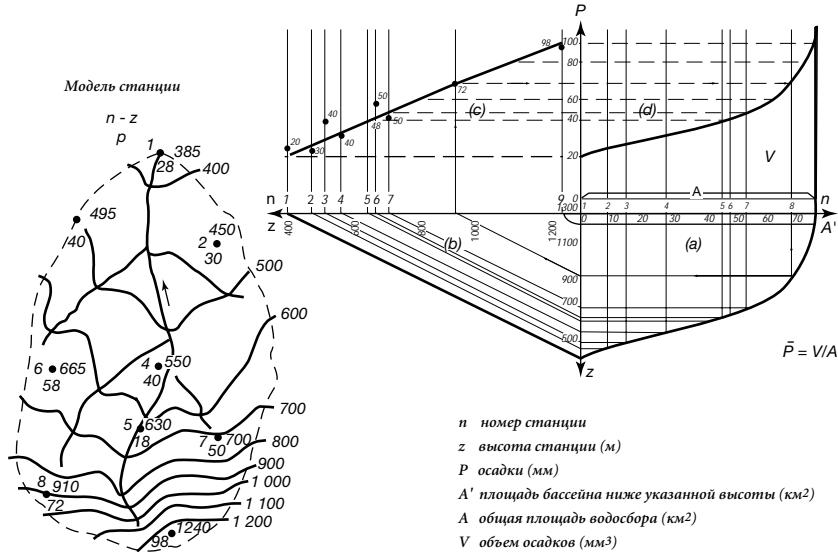


Рисунок 30.5 —Гипсометрический метод

Местоположение на оси  $x$  идентификаторов станции определяется путем проведения линий, параллельных оси  $x$  от точек на оси  $y$ , соответствующих высотам станций, до гипсографической кривой и от нее вверх до оси  $x$ . Местоположение идентификаторов станций на оси  $x$  определяется затем, как указано в квадрантах (а) и (б), линиями в квадранте (б), спроектированными под углом в  $60^{\circ}$  к оси  $y$ .

Кривая в квадранте (с) строится путем нанесения значений осадков по станциям против точек, соответствующих каждой станции. Из этого квадранта полученные величины проектируются на квадрант (д) и наносятся против соответствующих точек, обозначающих станции, и таким образом получается кривая осадков. Площадь в квадранте (д), лежащая ниже этой кривой, отвечает объему осадков. Разделив эту площадь на общую площадь бассейна, получают величину среднего слоя осадков.

Следует иметь в виду, что квадранты (а) и (б) остаются постоянными для каждого бассейна, и только кривые в двух верхних квадрантах приходится строить заново для каждого ливня. Этот метод можно также использовать для определения средних по площади месячных и годовых величин осадков.

### Список литературы

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1988: *Руководство по климатологическим практикам*, глава 5, ВМО-№ 100, Женева.
2. Chang, M. and Lee, R., 1974: Objective double-mass analysis. *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 6, pp. 1123-1126.
3. United Nations Economic Commission for Asia and the Far East/World Meteorological Organization, 1960: *Hydrologic Networks and Methods*. Flood control series, No. 15.
4. Searcy, J. K. and Hardison, C. H., 1960: Double-mass curves. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1541-B*, Reston, Virginia.
5. World Meteorological Organization, 1990: *Statistical Analysis of Series of Observations* (R. Sneyers). Technical Note No. 143, WMO-No. 415, Geneva.
6. World Meteorological Organization, 1992: *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 35, WMO-No. 749, Geneva.
7. Linsley, R. K., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H., 1949: *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
8. Linsley, R. K., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H., 1958: *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill, New York.
9. Rainbird, A. F., 1967: *Methods of Estimating Areal Average Precipitation*. Reports on WMO/IHD Projects, Report No. 3.
10. World Meteorological Organization, 1986: *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*. Operational Hydrology Report No. 1, WMO-No. 332, Geneva.

## ГЛАВА 31

### АНАЛИЗ ТАЛОГО СТОКА

#### 31.1       **Общие положения**

Снеготаяние, с точки зрения формирования запасов воды, идущих на инфильтрацию и образование стока, является аналогичным дождевым осадкам, за исключением относительно небольшого запаса воды в снежном покрове и растянутости периода снеготаяния. В периоды, когда осадки не выпадают, последовательные изменения за каждые сутки запасов воды в тающем снежном покрове, по данным измерений, практически аналогичны суточным приращениям дождевых осадков. Обычные измерения изменений запасов воды в снеге не дают удовлетворительных результатов, главным образом, из-за существующих погрешностей при наблюдениях и взятии проб. Последовательное взятие проб снега на местности сопряжено с получением изменчивых данных во времени и пространстве. Есть две дополнительные и вынужденные причины, почему снеготаяние необходимо рассчитывать, а не наблюдать. Одна из них связана с прогнозированием стока, когда выгоднее прогнозировать факторы снеготаяния, а не просто ожидать его результатов. Вторая причина, связанная, в частности, с проектированием и планированием, заключается в необходимости экстраполяции экстремальных величин снеготаяния на основе физических процессов.

#### 31.2       **Теория снеготаяния в точке**

Рациональный подход к расчету интенсивности снеготаяния основан на тепловом балансе, который учитывает основные виды теплообмена. Тепло передается снегу путем поглощения прямой солнечной радиации, длинноволновой радиации, конвективного теплообмена с атмосферой, в виде скрытой теплоты парообразования при конденсации из воздуха; сравнительно небольшое тепло поступает от дождевых осадков и ничтожно малое количество тепла — от подстилающего грунта.

Обычно тающий снежный покров содержит жидкой воды от 2 до 5 % по весу, однако в исключительных случаях, в течение коротких промежутков времени, когда интенсивность снеготаяния превышает интенсивность водоотдачи, содержание воды может доходить до 10 %. Таким образом, в течение коротких периодов времени общее количество воды в снежном покрове может несколько превысить то количество воды, которое фактически сформировалось в процессе

снеготаяния при данных метеорологических условиях. С практической точки зрения эта доля воды за счет предварительно растаявшего снега, не явно входит в эмпирические константы, которые лишь приблизительно известны и обременены другими, более значительными неопределенностями.

Величина поглощенной солнечной радиации меняется в зависимости от широты местности, сезона, времени суток, атмосферных условий, залесенности, уклона, ориентации поверхности и отражательной способности снега. Влияние широты местности, времени года, времени суток и атмосферных условий интегрально учитывается посредством наблюдений за солнечной радиацией, данные которых обычно интерполируются из-за редкой сети станций. Это влияние можно также рассчитать за заданные сутки с помощью формул или графиков, выражающих солнечную радиацию как функцию облачности, времени года и широты местности.

Значительное влияние на передачу солнечной радиации снегу оказывает лесной покров; на экспериментальных бассейнах это влияние было учтено в виде эмпирического коэффициента, который связал коэффициент пропускания радиации с густотой полога леса. Как правило, влияние направления и крутизны склона и лесного покрова выражается постоянными коэффициентами, полученными эмпирически для данного водосбора.

Отражательная способность поверхности снежного покрова колеблется в пределах от 90 % для свежевыпавшего снега до почти 40 % для слежавшегося снежного покрова, состоящего из крупных зерен и покрытого, как правило, к концу сезона тонким темным слоем органической или минеральной пыли. В конце весны, в средних широтах, на открытых местах снежный покров с низкой отражательной способностью поглощает обычно такое количество солнечной радиации, которого достаточно для образования 50 мм талой воды в сутки.

Длинноволновый радиационный обмен представляет собой разницу между радиацией, излучаемой поверхностью снежного покрова и встречным излучением облаков, деревьев и атмосферы. При низкой сплошной облачности или при наличии густого леса, при температуре воздуха выше 0 °C такой обмен способствует поступлению дополнительного тепла к снежному покрову. Длинноволновая радиация из атмосферы при отсутствии облачности и леса является, главным образом, функцией температуры воздуха и почти всегда меньше излучения снега. Баланс длинноволновой радиации обычно колеблется в пределах от прироста тепла, эквивалентного слою талой воды в 20 миллиметров в сутки, до потери тепла, эквивалентной слою замерзшей воды в 20 миллиметров в сутки.

При конвективном обмене тепла основными факторами являются температурный градиент в слое воздуха непосредственно над снегом и интенсивность турбулентного перемешивания, выраженная через скорость ветра.

При выделении тепла за счет конденсации основными факторами являются градиент упругости водяного пара и интенсивность турбулентного перемешивания, которая может быть выражена через скорость ветра.

Результирующий обмен теплом в процессе турбулентного обмена может меняться от прироста тепла, эквивалентного слою талой воды в более чем 100 миллиметров в сутки, до потерь тепла, соответствующих слою замерзшей воды в 2–3 миллиметра. Причина того, что прирост тепла обычно намного превышает его потери, заключается в том, что градиенты температуры и упругости водяного пара при увеличении тепла могут быть очень высокими при температуре снега, ограниченной 0 °C, в то время как при очень низких температурах и упругостях водяного пара, сопровождающих потери тепла, температура поверхности снега обычно понижается, что вызывает уменьшение градиентов.

Поступление тепла с осадками можно рассчитать по скрытой теплоте плавления льда ( $80 \text{ кал}\cdot\text{г}^{-1}$ ), который заключен в снеге, и по температуре дождя, за которую можно принять температуру смоченного термометра. Расчеты показывают, что для того чтобы получить 25 миллиметров слоя талого снега в сутки, нужен очень сильный ливень (по крайней мере 120 миллиметров слоя воды при температуре воздуха 16 °C).

Интенсивность поступления тепла из почвы к только что выпавшему снегу может быть очень высокой лишь в течение короткого промежутка времени. Однако при обычном установившемся градиенте температуры в почве после образования устойчивого снежного покрова приток тепла эквивалентен стаиванию не более 1 миллиметра снега в сутки.

Указанные выше интенсивности снеготаяния при разных видах теплообмена неаддитивны. Например, условия максимального турбулентного обмена возникают при дождливой погоде и не могут совпадать с максимальной солнечной радиацией.

В литературе приводится большое число различных уравнений, которые отражают режимы теплообмена через наблюденные или поддающиеся наблюдениям элементы. Обычно такие уравнения имеют следующий вид.

Поглощенная и рассеянная солнечная радиация  $R_{ab}$ ,  $\text{кал}\cdot\text{см}^{-2}$ , может быть определена из уравнения

$$R_{ab} = (1 - B)R_s C_s, \quad (31.1)$$

где  $R_s$  — суммарная коротковолновая радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, на соответствующей широте, в определенное время года, при безоблачном небе;  $B$  — отражательная способность снега;  $C_s$  — функция облачности, которая в бывшем СССР определялась как

$$C_s = 1 - (0,14N + 0,53N_1), \quad (31.2)$$

где  $N$  — общая облачность; а  $N_1$  — нижняя облачность; обе — в долях покрытия облаками небесного свода. Для холмистых территорий часто применяется дополнительное выражение.

Влияние лесного покрова на уменьшение солнечной радиации можно учесть с помощью следующего коэффициента:

$$K_f = 1 - f \sqrt{1 - (1 - C)^2}, \quad (31.3)$$

где  $f$  — доля солнечной радиации, которая задерживается определенным типом леса при 100 % сомкнутости крон (обычно задерживается около 0,9 радиации); и  $C$  — сомкнутость крон.

Потери на эффективное излучение снега  $R_I$ , кал·см<sup>-2</sup>·мин<sup>-1</sup>, определяются по уравнению

$$R_I = \sigma \left( d_n \theta_n^4 - d_a \theta_a^4 U_e C_I \right), \quad (31.4)$$

где  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана, равная  $8,13 \times 10^{-11} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$ ;  $\theta_n$  и  $\theta_a$  — абсолютные температуры снега и воздуха (последняя на высоте 2 метра от поверхности земли);  $d_n$  и  $d_a$  — коэффициенты, характеризующие излучательную способность снега и воздуха по отношению к черному телу, оба равны приблизительно единице;  $U_e$  — функция влажности, выражающая влияние водяного пара на длинноволновую радиацию;  $C_I$  — функция облачности, которая применяется к длинноволновой радиации, в то время как функция  $C_s$  — к коротковолновой радиации. Функция  $U_e$  выражается по-разному разными исследователями; обычное выражение для нее представляется в виде  $U_e = a + b\sqrt{e}$ . Параметр  $a$  принимается равным 0,62 и  $b = 0,05$ ;  $e$  — упругость водяного пара, гПа, на высоте два метра от поверхности снега. При обычном значении упругости водяного пара над поверхностью тающего снега функция  $U_e$  колеблется от 0,7 до 0,8. Функция  $C_I$  может быть представлена в виде

$$C_I = 1 + 0,12(N + N_1), \quad (31.5)$$

где  $N$  — общая облачность;  $N_1$  — нижняя облачность, обе величины — в долях покрытия небесного свода.

При наличии лесного покрова встречное длинноволновое излучение  $R_d$  может быть определено по выражению

$$R_d = [F + (1 - F) U_e] \sigma \theta_a^4, \quad (31.6)$$

где  $F$  — степень лесистости. Эффективный лесной покров можно оценить по аэрофотоснимкам густоты полога леса или как остаточную эмпирическую константу.

Перенос тепла при турбулентном обмене выражается с помощью двух уравнений соответственно для прямой и скрытой теплоты:

$$Q_h = ku (\theta_a - \theta_n), \quad (31.7)$$

$$Q_e = ci (e_a - e_n), \quad (31.8)$$

где  $u$  — скорость горизонтального потока ветра на заданной высоте;  $(\theta_a - \theta_n)$  — разность температур воздуха и снега;  $(e_a - e_n)$  — соответствующий градиент упругости водяного пара. Эмпирические постоянные  $k$  и  $c$  учитывают коэффициент массообмена, аэродинамическую шероховатость поверхности снега, устойчивость (сопротивление перемещению плотного слоя воздуха над снегом), структуру ветра, высоту установки приборов над поверхностью снега и плотность воздуха. Постоянная  $k$  учитывает удельную теплоемкость воздуха, а  $c$  — скрытую теплоту парообразования в воздухе. Последняя постоянная может также включать количество конденсата, добавляющегося к талой воде в процессе конденсации, если только этот конденсат не учитывается каким-либо иным способом.

### 31.3 Расчет снеготаяния на водосборе при отсутствии дождя

Интегрирование рациональной функции снеготаяния по значительной разнородной площади водосбора является очень трудной задачей и практически бесполезным делом при отсутствии соответствующего оборудования. Измерение количества талой воды или интенсивности снеготаяния приводит к необходимости учета водоотдачи в дополнение к учету тепла. При отсутствии дождя существенную роль приобретает радиационный обмен и, следовательно, влияние редко измеряемой отражательной способности снега, а также густоты полога леса. Суточные значения солнечной радиации на данной широте и в данное время года зависят от местной облачности, наблюдения за которой, в свою очередь, достаточно субъективны и редко увязываются со способностью атмосферы пропускать радиацию. Кроме того, возникает проблема определения действующей площади снеготаяния.

Такая действующая площадь может быть определена как территория, на которой происходит снеготаяние или на которой талая вода достигает почвы. Эта площадь, так или иначе определенная, ежедневно меняется. Уравнения, приведенные в разделе 31.1, можно представить в виде, при котором они дают суммарные суточные значения, и тогда можно учитывать ежедневный ход снеготаяния. Если суточный цикл включает ночное замерзание, следует учитывать расходуемые на это тепло и влагу. В самом начале периода снеготаяния некоторое количество тепла необходимо, чтобы повысить температуру снега до  $0^{\circ}\text{C}$  и дать возможность растаять такому количеству снега, которое соответствует водоудерживающей способности снежного покрова. Это количество тепла относительно мало по сравнению с тем, которое необходимо для таяния снежного покрова.

Наиболее широко распространенный метод расчета снеготаяния по всему бассейну — использование метода градусо-дней. Обычно имеются данные о температуре воздуха, и изменения температуры над увлажненной поверхностью, как правило, определяют для получения и использования функций градусо-дней. Есть два соображения в пользу применения метода градусо-дней. Во-первых, ход температуры воздуха у поверхности снега отражает в основном физическую сущность тех же самых процессов теплообмена, которые приводят к таянию снега. Во-вторых, каждый элемент теплообмена связан в той или иной степени с температурой воздуха, за исключением случаев, когда имеют место аномальные скорости ветра. Например, минимальная суточная температура воздуха хорошо коррелируется с температурой точки росы, которая определяет упругости давления водяного пара при таянии, вызванном конденсацией. Максимальная суточная температура является показателем солнечной радиации. Для обычного диапазона температур длинноволновую радиацию можно выразить как линейную функцию температуры воздуха.

Предпринимались попытки придать максимальной и минимальной суточной температуре воздуха разные веса и использовать вместо 0 °C другое значение критической температуры для подсчета градусо-дней. Известны также попытки разделить сутки на более короткие промежутки времени и использовать градусо-часы. Однако суточный цикл теплообмена и снеготаяния делает сутки логической и удобной единицей для определения снеготаяния, а 0 °C остается наиболее подходящей исходной температурой по отношению к средней суточной, максимальной и минимальной температуре.

В таблице 31.1 приведены усредненные коэффициенты стаивания для нескольких регионов в средних широтах Северной Америки, выраженные в миллиметрах слоя талой воды, для среднесуточной, максимальной и минимальной температур воздуха выше 0 °C. Конкретные значения коэффициентов могут существенно отличаться от этих усредненных величин.

Таблица 31.1  
Коэффициент стаивания (мм·°C<sup>-1</sup>) для горных районов Северной Америки

Месяц	Умеренно облесенные	Частично облесенные	Безлесные
Апрель	2	3	4
Май	3	4	6
Июнь	4	6	7

Аналогичные значения коэффициентов стаивания приведены в таблице 31.2 для равнинных районов умеренных широт бывшего СССР.

Таблица 31.2

**Коэффициенты стаивания ( $\text{мм} \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$ ) для равнинных районов бывшего СССР**

Безлесные районы	5
Редкие хвойные и средней густоты лиственные леса	3 – 4
Хвойные леса средней густоты и густые смешанные леса	1,7 – 1,8
Густые хвойные леса	1,4 – 1,5

При наличии неглубокого снежного покрова количество талой воды, проходящей через снежный покров, и продолжительность ее прохождения не имеет существенного значения по сравнению с количеством и продолжительностью прохождения талых вод в почве и теми неопределенностями, которые имеют место в отношении установления самого количества талой воды. Время, требующееся для просачивания талой воды сквозь снег, составляет примерно час плюс еще по одному часу на каждые 50 см высоты снега.

Пространственные изменения в интенсивности снеготаяния, а также в распределении и сокращении размеров площадей, покрытых снежным покровом в период снеготаяния, связаны с некоторыми постоянными характеристиками водосбора, такими как рельеф и распределение растительного покрова. Соответственно интенсивность таяния снега на водосборе отражает последовательные изменения действующей площади снежного покрова и условий залегания снежного покрова в период снеготаяния. Эти изменения влияют на форму эмпирических S-образных кривых подобно тем, которые приведены на рисунке 31.1. Вследствие неравномерного распределения снега и влияния местных факторов на интенсивность его таяния, некоторая часть снега начинает таять раньше по сравнению с остальным снежным покровом. Таким образом, средняя интенсивность таяния на единице площади, довольно низкая в самом начале периода снеготаяния, увеличивается по мере увеличения действующей площади. К концу периода таяния крутизна кривых на рисунке 31.1 становится меньше, так как уменьшается и площадь снеготаяния. Наиболее крутые участки кривых соответствуют периоду, когда снеготаяние происходит на большой части площади. Пропорциональность между интенсивностью снеготаяния и исходным количеством снега имеет место, главным образом, потому что с увеличением количества снега увеличивается площадь, охваченная снеготаянием. Наиболее крутые отрезки кривых на рисунке 31.1 имеют наклон, который соответствует данным таблиц 31.1 и 31.2.

Потери на испарение со снега ничтожно малы за короткие периоды снеготаяния, и их может вполне уравновесить конденсация на поверхности снега.

В горных районах, где накапливается большое количество снега, где сезон таяния может длиться несколько месяцев и где условия таяния существенно изменяются с высотой, кривые, подобно тем, что изображены на рисунке 31.1,

имеют ограниченную надежность. Испарение может быть весьма значительным в течение длительных теплых периодов. Во время сезона снеготаяния применяются последовательные авиационные и другие виды съемок для определения изменений площади, покрытой снегом, и данные метеорологических наблюдений интерпретируются с тем, чтобы установить изменения интенсивности снеготаяния с высотой. Последовательность снеготаяния определяется по высотным зонам. Кроме того, при наличии глубокого снежного покрова в горах большее внимание следует уделять задержанию талых вод в снеге.

При необычно высокой скорости ветра или при очень высокой влажности воздуха следует использовать более высокие коэффициенты стаивания, чем их средние значения.

### 31.4 Расчет снеготаяния на водосборе при выпадении дождя

Во время сильных ливней интенсивность и объем снеготаяния могут оказаться сопоставимыми с погрешностью определения количества и интенсивности ливня.

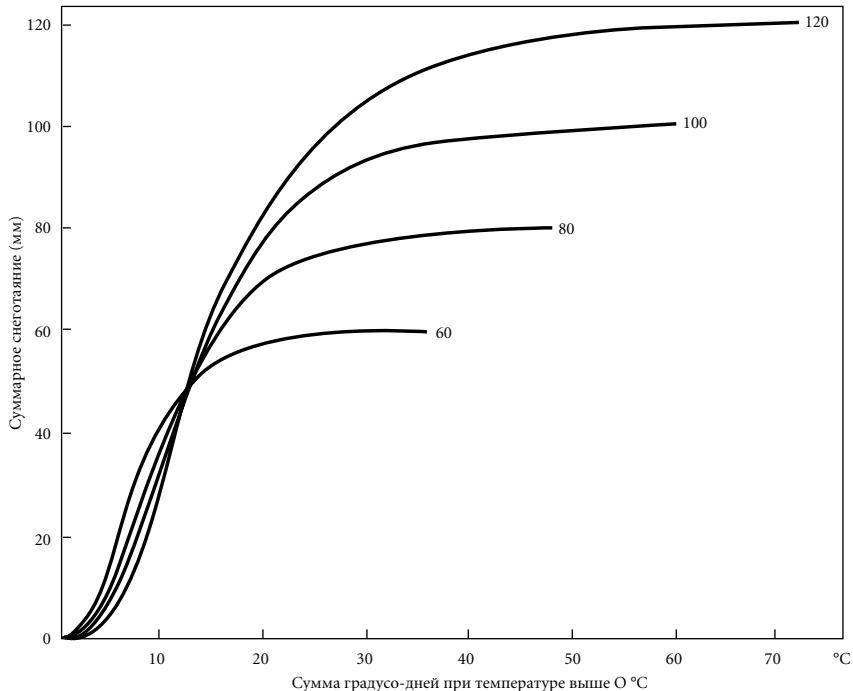


Рисунок 31.1 — Типичная зависимость между суммарным снеготаянием и суммой градусо-дней для речного бассейна

Во время ливней, сопровождающихся значительным турбулентным перемешиванием и низкой облачностью, коротковолновая солнечная радиация сравнительно невелика, и основными источниками тепла поэтому являются длинноволновая радиация, конвекция и конденсация. Из-за трудности выделения доли ливневых осадков при снеготаянии, вопрос о снеготаянии во время ливней остается в значительной степени теоретическим при крайне малых эмпирических решениях.

Корпусом военных инженеров США [1] предложены следующие уравнения: для густо залесенных территорий

$$M = (0,3 + 0,012P)\theta + 1,0, \quad (31.9)$$

и для открытых или частично залесенных территорий

$$M = (0,1 + 0,12P + 0,8ku)\theta + 2,0, \quad (31.10)$$

где  $M$  — суточное количество талой воды, мм;  $P$  — суточные дождевые осадки, мм;  $\theta$  — среднесуточная температура воздуха, °С;  $k$  — постоянная для данного бассейна, изменяющаяся в пределах от 0,3 для умеренно густого леса до 1,0 для открытых безлесных территорий;  $u$  — скорость ветра, м·с<sup>-1</sup>, на высоте 10 м. Принимается, что воздух находится в состоянии насыщения влагой. Постоянные (1,0 и 2,0) учитывают влияние на таяние снега тепла, поступающего из почвы, и незначительную долю солнечной радиации, которая проникает сквозь дождевые облака.

### 31.5 Оценка интенсивности водоотдачи

Чтобы определить суммарный талый сток с равнинных водосборов, можно использовать водобалансовые зависимости, рассмотренные в разделе 45.2. На их основе суммарный талый сток может быть рассчитан в начале периода снеготаяния. Однако для расчета гидрографа часто требуются значения суточного поступления талой воды. Для определения этих величин необходимо учитывать следующие основные факторы:

- a) приток тепла к снежному покрову;
- b) водоудерживающую способность снега;
- c) площадь, покрытую снегом;
- d) водоудерживающую способность бассейна.

В общем виде суточное поступление талых вод  $Q_n$  может быть описано с помощью следующего уравнения:

$$Q_n = \frac{m}{I - \alpha_o} f_1(M, I_f) f_2(M, \alpha_o), \quad (31.11)$$

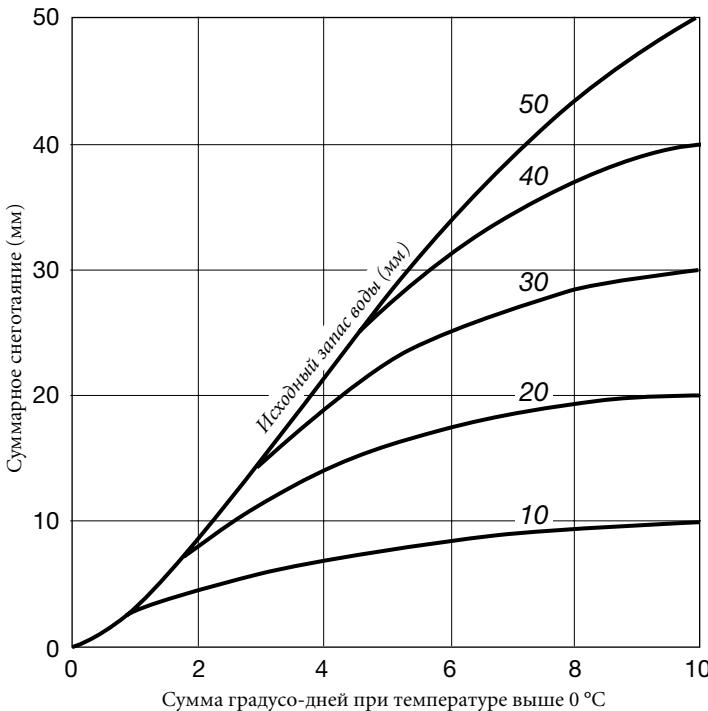


Рисунок 31.2 — Зависимость температуры воздуха от снеготаяния при различных значениях начального запаса воды в снеге для равнинного бассейна

где  $m$  — суточное стаивание;  $\alpha_0$  — исходное относительное количество талой воды, задержанной снегом, равное верхнему пределу водоудерживающей способности снежного покрова;  $f_2(M, \alpha_0)$  — функция, выражающая относительную площадь поступления талой воды, связанную с суммарным стаиванием  $M$  и исходным задержанием воды снежным покровом;  $\alpha_0, f_1(M, I_f)$  — коэффициент стока как функция суммарного стаивания и индекса инфильтрационной способности бассейна  $I_f$ . Первоначальное количество талой воды, задержанной снегом, зависит от структуры и плотности снежного покрова и может быть определено экспериментальным путем. Ограниченные данные показывают, что в качестве первого приближения значения  $\alpha_0$  для равнинных водосборов с плотностью снега в пределах от 0,25 до 0,30 могут быть приняты равными 0,15–0,20. Относительная площадь, на которой происходит поступление талой воды

$f_2(M, \alpha_o)$ , зависит от распределения снежного покрова по площади. Таким образом, увеличение относительной площади водоотдачи связано с увеличением площади, покрытой влагонасыщенным снегом. Когда снежный покров остается в виде отдельных пятен, относительная площадь водоотдачи уменьшается с уменьшением площади, покрытой снегом. Простейшая методика расчета площади водоотдачи основана на допущении равномерного стаивания снега и одинаковой исходной водоудерживающей способности снега по всему бассейну. При таких условиях функция  $f_2(M, \alpha_o)$  может быть определена как разность между двумя функциями:

$$f_2(M, \alpha_o) = f_3(M) - f_4(M), \quad (31.12)$$

где  $f_4(M)$  — площадь бассейна, с которой стаял снег;  $f_3(M)$  — интегральная функция относительной площади, на которой снег становится влагонасыщенным:

$$f_3(M) = f_4\left(\frac{M}{\alpha_o}\right). \quad (31.13)$$

Описанный выше метод дает возможность построить графическую зависимость между суммой градусо-дней и суммарным снеготаянием для различных значений среднего запаса воды в снеге. Как видно из рисунка 31.2, такие зависимости удобны для оперативного использования.

Коэффициент стока  $f_1(M, I_f)$  представляет собой функцию, которая возрастает с увеличением стаивания, так как инфильтрационная способность речного бассейна при этом уменьшается. Зависимость между этими переменными величинами может быть получена эмпирическим путем с использованием в качестве параметров индекса предшествующего увлажнения почвы и глубины ее промерзания. Для этой цели могут быть использованы и водобалансовые зависимости. После получения такой зависимости для речного бассейна функция  $f_1(M, I_f)$  определяется путем дифференцирования:

$$f_1(M, I_f) = \frac{dQ(W, I_f)}{dW}, \quad (31.14)$$

где  $Q$  — сезонный сток;  $W$  — средний запас воды в снеге плюс осадки. С помощью этого метода можно получить ряд кривых для различных значений индекса инфильтрационной способности  $I_f$ .

### 31.6 Испарение с поверхности снежного покрова

Уравнения для расчета конденсации на снежном покрове могут быть использованы для оценки испарения со снега. Испарение имеет место в том случае, когда упругость водяного пара над снегом с высотой уменьшается, а конденсация происходит тогда, когда упругость водяного пара уменьшается по мере приближения к поверхности снега. Измерить температуру поверхности снега трудно, и делают это редко, только после того как снег начал таять.

Испарение со снега представляет собой саморегулирующийся процесс, потому что при этом происходит охлаждение снега, благодаря чему поддерживается сравнительно небольшой градиент влажности в слое воздуха над снегом. И наоборот, упругость давления водяного пара во время конденсации на поверхности снега ограничивается температурой таяния снега, в то время как упругость водяного пара в воздухе может быть значительно выше. Соответственно интенсивность конденсации, как правило, гораздо выше, чем интенсивность испарения.

Измерение испарения с поверхности снега или льда является трудной задачей и по своей точности близко к точности расчета испарения. Как правило, принимается, что в зимние периоды испарение с типичной поверхности снега происходит в пределах от 0 до 20 миллиметров в месяц. Во время периодов таяния снега преобладает конденсация, интенсивность которой колеблется от нуля до примерно 10 миллиметров конденсата в сутки.

Возможно, что при холодной сухой погоде и ясном небе происходит одновременное таяние снега и испарение, а в редких случаях, при балансе тепла и влаги, испарение равно снеготаянию. Иногда может иметь место сублимация, т. е. снег преобразуется из твердого состояния в парообразное, минуя жидкую фазу.

### 31.7        **Вероятные максимальные осадки и снеготаяние**

#### 31.7.1      **Введение**

В очень крупных бассейнах, расположенных в высоких широтах, основной причиной возможного максимального паводка может быть снеготаяние, а не дождевые осадки. В этом случае объем паводочного снега и временное распределение паводка основывается на расчете снеготаяния по данным о максимальных значениях температуры воздуха, скорости ветра, точки росы и солнечного излучения, аналогично максимизации ливневых осадков (раздел 29.4.1).

В более низких широтах дождевые осадки являются основным источником возможных максимальных паводков, а снеготаяние дает лишь некоторое дополнительное приращение на гидрографе максимального стока. В этом случае к максимизированному слою осадков прибавляется слой талой воды, рассчитанный для метеорологических условий, сопутствовавших ливню.

Для некоторых бассейнов только детальный анализ позволяет установить, является ли вероятный максимальный паводок результатом ливней в холодный сезон в сочетании со снеготаянием, или же результатом летних ливней, которые могут быть более интенсивными, но которые не совпадают со снеготаянием.

#### 31.7.2      **Максимально возможное снегонакопление**

Вклад снеготаяния в формирование максимального возможного паводка будет зависеть от максимальной интенсивности таяния и запаса воды в снеге на момент начала снеготаяния. Запас воды в снеге представляет собой высоту

слоя воды, образовавшейся в результате снеготаяния, и зависит от плотности снега и высоты снежного покрова. Для расчета максимально возможного скопления снега используются самые различные методы, однако наиболее широко распространены три следующих метода [2]:

- a) метод частичного сезона: суммируются максимальные значения снегозапасов за каждый месяц или за двухнедельный период, в соответствии с частотой наблюдений, с целью получения одного «синтетического» года с очень большим количеством снега. Этот метод может быть применен для расчетов и за более короткие интервалы времени, например за неделю или четырехдневные периоды, при наличии соответствующих данных наблюдений;
- b) максимизация количества выпавших твердых осадков: определяется отношением максимального содержания влаги в атмосфере на рассматриваемой площади за то время года, когда имеют место твердые осадки, к фактическому содержанию влаги в выпавшем снеге. Наблюденное количество твердых осадков за снегопад умножается на это отношение, в результате чего получаем максимизированное количество осадков для данного снегопада. Максимизация содержания влаги выполняется только для снегопадов, а не для дождей;
- c) статистические методы: производится частотный анализ данных об осадках и глубине залегания снежного покрова, чтобы определить их значения для периодов различной продолжительности. Анализируются три типа данных — слой осадков, измеренный на станции, высота снежного покрова в бассейне и запас воды в снеге.

### 31.7.3 Расчеты снеготаяния

В силу сложного пространственно-временного хода снеготаяния на большинстве водосборов, из-за различий в уклонах, экспозиции, зеленности, а также в глубинах залегания снежного покрова, метод градусо-дней часто используется для практического решения проблемы оценки снеготаяния на водосборе. Максимальные значения градусо-дней можно вычислить по данным измерения температуры воздуха в рассматриваемом бассейне или на прилегающей территории, и использовать их для оценки максимально возможных снегозапасов, что необходимо для расчета максимально возможного стока половодья.

Более рациональный метод расчета снеготаяния в бассейне с учетом составляющей от дождей описан в разделе 31.4. При оценке максимально возможной интенсивности таяния предполагается, что температура воздуха и скорость ветра принимаются соответствующими тем синоптическим условиям, при которых формируются максимально возможные осадки. Принимается также, что существует «оптимальный» снежный покров. В такой ситуации термин «оптимальный» означает, что:

- a) запас воды в снеге таков, что он полностью растает в течение данного ливня;
- b) снежный покров уже начал таять и содержит максимальное количество воды;
- c) запасы воды в снежном покрове распределены таким образом, что их максимум приходится на зоны максимального снеготаяния, что в корне отличается от обычной ситуации увеличения запаса воды в снеге с увеличением высоты.

### 31.8        **Оценка стока при коротких периодах снеготаяния**

#### 31.8.1      **Равнинные районы**

В равнинных районах, где приращение стока в период половодья сравнительно мало, а период снеготаяния короткий, сток может быть оценен путем использования полученных расчетным путем значений снеготаяния с помощью описанных выше методов в связях осадки—сток (глава 33). Может оказаться необходимым использовать связь, которая соответствует высокому проценту стока, потому что снежный покров или холодная погода сдерживают потери на суммарное испарение в период, предшествующий снеготаянию.

#### 31.8.2      **Горные территории**

На горных водосборах, где преобладает глубокий снежный покров, а сезон таяния снега продолжается несколько месяцев, нет необходимости применять обязательно те методы, которые обычно используются для расчета стока, вызванного краткосрочными дождевыми осадками. Вода, образовавшаяся от снеготаяния в течение суток, обычно формирует сток в течение длительного периода, на который насылаются порции воды от снеготаяния за многие другие дни. Кроме того, при продолжительном периоде снеготаяния большое значение приобретают потери на суммарное испарение, которыми можно пренебречь при непродолжительных дождевых осадках.

Одним из путей оценки стока по данным о суточных значениях снеготаяния является расчет сезонного объема стока (глава 45) с последующим распределением этого объема в соответствии с наблюденными или вычисленными для данной территории суточными значениями интенсивности снеготаяния (разделы 31.3 и 31.4), характеристиками аккумулирующих емкостей бассейна с действующими площадями, а также сезонным суммарным испарением. Бассейновые запасы и добегание воды можно рассчитать с помощью кривых добегания, аналогичных тем которые используются в резервуарных моделях с константами, определенными эмпирически по историческим данным.

Если же водосбор настолько мал, что суточные приращения снеготаяния не отражаются на объеме стока, следует прибегнуть к шестичасовым интервалам времени, или же при построении кривых добегания следует использовать типовое суточное распределение снеготаяния.

**Список литературы**

1. U.S. Army Corps of Engineers, 1960: *Runoff from Snowmelt*. Engineer Manual 1110-2-1406, U.S. Department of the Army, Washington, D.C.
2. Bruce, J. P., 1962: Snowmelt contributions to maximum floods. *Proceedings of the Nineteenth Annual Eastern Snow Conference*, 8–9 February 1962, Yale University, New Haven, Connecticut, pp. 85-103.



## ГЛАВА 32

### ОЦЕНКА ДАННЫХ О РЕЧНОМ СТОКЕ

#### 32.1       **Общие положения**

Как правило, анализ данных о речном стоке проводится для определенных практических целей в конкретных районах. Если в таких районах имеются данные наблюдений за речным стоком, их необходимо использовать при анализе. Если точность или репрезентативность таких данных недостаточна, они требуют увязки, чтобы удовлетворять стандартным требованиям. При отсутствии необходимых данных наблюдений возникает потребность в привлечении данных о стоке из других бассейнов или в использовании других видов гидрологических и метеорологических данных.

#### 32.2       **Увязка данных**

Чтобы вычислить расходы воды за те периоды, по которым данные отсутствуют или ненадежны, следует предпринять определенные усилия.

Эффективным средством для оценки расходов воды за периоды с недостаточным количеством данных наблюдений служат гидрографы суточных расходов, построенные на полулогарифмической клетчатке, потому что такие гидрографы при их анализе за период наблюдений отражают типичные соотношения между объемом ливневых осадков и дождевым стоком. Достаточно надежную оценку расхода воды можно получить, используя такие гидрографы с дополнительными данными, такими, как измеренные осадки, записи на лентах самописцев, аналогичные гидрографы стока по другим рекам. Использование гидрографов стока также применимо при других видах обработки гидрологических данных, например при выделении базисного стока за период паводка, как это описано в разделе 33.3.1.

Необходимость увязки данных о речном стоке может быть выявлена при анализе двойной интегральной кривой, который описан в разделе 30.2.2; однако эта увязка должна основываться скорее на повторном анализе наблюдений, чем на результатах анализа двойной интегральной кривой.

Строится график связи суммарного стока по одной станции относительно среднего суммарного стока по группе станций. Если полученная кривая имеет излом, данные о стоке подвергаются проверке с целью выбора другого метода обработки данных наблюдений или сбора данных, или же, при необходимости,

повторного пересчета. В случае, если ставится цель получить такие данные, которые бы отражали каким был бы сток, если бы на водосборе не было никаких антропогенных изменений, рассчитанные расходы воды должны быть откорректированы с учетом заборов или сбросов воды в пределах водосбора, а также с учетом изменений в водопотреблении перед составлением графика. Если причины излома двойной интегральной кривой выяснить невозможно, то никаких корректировок данных наблюдений делать не следует.

Если при вычислении суточных расходов воды используется достаточное количество интерпретаций, то точность таких данных будет, как правило, выше, чем точность любого другого элемента водного баланса водосбора. Речной сток является единственным элементом баланса, данные наблюдений за которым отражают его интегральное значение для всего водосбора. По всем другим элементам (например: осадкам, почвенной влаге и подземным водам) наблюдения «привязаны» к определенной площади. Поэтому корректировка данных о речном стоке на основании данных о других элементах осуществляется очень редко. Гидрологические сопоставления могут показывать, что данные о речном стоке следует проверить еще раз, но их не следует использовать для определения корректирующих поправок.

Следует различать точность данных наблюдений за речным стоком и точность, с которой эти данные характеризуют естественный сток с водосбора. Данные наблюдений могут быть точными, даже в том случае, если половина стока реки забирается выше по течению на различные хозяйствственные нужды. В тех гидрологических исследованиях, где необходимо оценивать естественный сток реки, восстановление стока следует производить по данным о водоотведении и водопотреблении. Эти поправки не дискредитируют рассчитанные таким путем данные о речном стоке.

В некоторых случаях при общих оценках данных наблюдений за речным стоком можно использовать метод водного баланса (раздел 37.2). Если сток или потери слишком велики или слишком малы без видимых на то причин по сравнению с вычисленными величинами по другим месяцам или другим рекам, данные наблюдений на опорной сети станций следует проверить еще раз, чтобы избежать возможных ошибок.

### 32.3 Пространственное распределение речного стока

Средний годовой сток одной реки существенно отличается от среднего годового стока другой реки. В период межени расходы на единицу площади на соседних реках могут отличаться в несколько раз. Для точного определения водности наблюдения на станции должны вестись в течение нескольких лет на месте будущего объекта или вблизи него. Для предварительного планирования, однако, можно использовать менее точную информацию. Источником такой информации являются карты среднегодового стока и корреляционные зависимости между данными наблюдений по станциям.

### 32.3.1 Карты среднегодового стока

Карты среднегодового стока могут полностью основываться на данных наблюдений за речным стоком, на данных наблюдений за осадками и испарением или на комбинации этих видов данных. Если на протяжении 10 и более лет действовали хорошие сети осадкомерных и гидрометрических станций, следует использовать и те, и другие ряды данных. Изолинии среднегодового стока должны быть согласованы с изогиетами среднегодовых осадков с учетом геологических условий региона. Они также должны быть увязаны с данными наблюдений других гидрометрических станций, пригодными для использования. Другими словами, данные наблюдений за стоком используются для определения среднего суммарного стока с водосбора, в то время как данные: об осадках, испарении, геологическом строении — используются при оценке распределения стока в пределах водосбора. Средние годовые потери воды, рассчитываемые как разность между значениями изогиет осадков и изолиний стока, служат ценным руководящим материалом для последующей интерпретации.

Если имеются только данные наблюдений за стоком, приближенная оценка распределения стока по площади может производиться на основе учета высоты местности и характера растительности. В основном сток увеличивается с высотой из-за большего количества выпадающих осадков и более низких температур воздуха. Характер же растительности служит показателем экспозиции склона, т. е. позволяет отличить более засушливые площади на подветренной стороне горы от хорошо увлажненных площадей, расположенных на той же высоте, но с наветренной стороны.

### 32.3.2 Вычисление среднего стока по данным об осадках и температуре воздуха

При наличии только данных об осадках и температуре воздуха, для расчета стока можно использовать метод, предложенный Лангбейном [1, 2]. Этот метод применим в тех случаях, когда с бассейна нет оттока подземных вод и когда запасы подземных вод существенно не изменяются из года в год. Ниже приводится модификация этого метода. Он основан на однозначной зависимости между  $P/F_\theta$  и  $Q/F_\theta$ , где  $P$  — среднее многолетнее количество годовых осадков;  $Q$  — средний многолетний годовой сток, измеренный в тех же единицах, что и  $P$ ;  $F_\theta$  — температурный фактор. Если  $P$  и  $Q$  выражены в сантиметрах,  $F_\theta = 10^{(0,027\theta+0,886)}$ , где  $\theta$  — средняя многолетняя годовая температура воздуха, °С.

Соотношение между  $\theta$  и  $F_\theta$  приводится ниже:

$\theta, ^\circ\text{C}$	$F_\theta$
-20	2,22
-10	4,13
0	7,69
10	14,3
20	26,6
30	49,7

Соотношение между  $P/F_\theta$  и  $Q/F_\theta$  приводится ниже:

$P/F_\theta$	$Q/F_\theta$
0	0,009
1	0,026
2	0,075
3	0,200
4	0,475
5	1,0
6	1,9
7	2,7
8	3,4
10	5,0
12	7,0
14	9,0

Если, например, средняя многолетняя годовая температура воздуха составляет 20 °C, а средние многолетние годовые осадки — 53 см, то  $F_\theta = 26,6$ , а отношение  $P/F_\theta = 2,0$ . Значение  $Q/F_\theta$  соответствующее отношению  $P/F_\theta = 2,0$ , будет равно 0,075; средний многолетний годовой сток равен при этом  $0,075 \times 26,6$  или 2,0 см. Однако, если бы количество осадков было равно 133 см, то отношение  $P/F_\theta$  будет равно 5,0; а отношение  $Q/F_\theta$  будет равно 1,0 при  $Q = 26,6$  см. В этом примере увеличение осадков на 150 процентов дает увеличение стока на 1 230 процентов.

Соотношение между  $P/F_\theta$  и  $Q/F_\theta$  может быть уточнено для случаев, когда выпадение основной массы осадков приходится либо на теплый, либо на холодный сезоны [1].

Хотя соотношение между  $P/F_\theta$  и  $Q/F_\theta$  а также влияние распределения осадков на сток по сезонам, основаны на данных, собранных в Соединенных Штатах, эти соотношения, вероятно, могут иметь более широкое применение. Возможность применения этих соотношений в других странах можно проверить путем построения графика зависимости между наблюдаемыми осадками и стоком описанным выше способом и путем сравнения полученных результатов с данными, приведенными выше.

Карта среднего многолетнего годового стока дает общее представление о потенциальной водности, однако она не отражает колебаний стока по годам и внутри года. Сток за некоторые годы может быть значительно ниже среднего многолетнего, причем даже в эти годы значительная часть стока будет наблюдаться во время паводков и поэтому не сможет быть использованной без регулирования. Многолетние колебания стока можно оценить путем применения частотного анализа. Внутригодовые колебания стока можно оценить путем анализа паводочного и меженного стока, рассмотренного в главах 35 и 36.

Средние многолетние годовые потери воды  $D$  определяются по соотношению

$$D = P - Q. \quad (32.1)$$

Для многих водосборов в зоне умеренного климата величина  $D$ , вычисленная за достаточно длительный период времени, изменяется сравнительно мало. Средние многолетние значения этих потерь, рассчитанные для соседних водосборов, могут быть использованы для оценки среднего многолетнего годового стока в рассматриваемом бассейне по данным наблюдений за осадками. В Западной Европе величина  $D$  обычно изменяется в пределах от 400 до 600 миллиметров. Для расчета  $D$  существуют разные эмпирические формулы, одна из которых была получена Тюрком [3]:

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}, \quad (32.2)$$

где  $L = 300 + 25\theta + 0,50\theta^3$ ;  $P$  — средние многолетние годовые осадки на водосборе;  $\theta$  — средняя многолетняя годовая температура воздуха.

Первым шагом при определении корреляционной связи между наблюденными данными о стоке и осадках является выбор подходящей группы метеостанций, расположенных в пределах рассматриваемого водосбора или на прилегающей к нему территории. Период наблюдений за дождевыми осадками по каждой из этих станций должен совпадать с периодом наблюдений за стоком. Он также должен перекрывать период, за который желательно иметь восстановленные данные о стоке. Ряды данных наблюдений за дождевыми осадками на каждой станции следует корректировать по методу двойной интегральной кривой (раздел 30.2.2) с учетом отклонений, которые могут возникнуть в силу локальных явлений.

Простейшим методом восстановления годовых значений стока является корреляция наблюденных средних годовых расходов воды с соответствующими суммами годовых осадков и применение полученного уравнения регрессии для вычисления расходов воды по данным об осадках за период отсутствия гидрометрических наблюдений.

Часто корреляционная связь между годовым стоком и годовыми осадками оказывается недостаточно надежной для ее практического применения, поэтому в таких случаях необходимо искать зависимость между месячными величинами стока и осадков. Одной из форм такой зависимости, учитывающей неравномерное распределение месячных осадков во времени, является выражение

$$Q = k(1 + aC_p)(P - P_o), \quad (32.3)$$

где

$$C_p = \frac{1}{P_{12}} \left( \frac{1}{132} \sum_{i=1}^{12} (P_i - P_{12})^2 \right)^{1/2}; \quad (32.4)$$

$Q$  — годовой сток;  $P$  — годовые осадки;  $P_i$  — осадки в течение месяца  $i$ ;  $P_{12}$  — годовые осадки, деленные на 12; а  $P_o$ ,  $a$  и  $k$  — постоянные, причем  $P_o$  — максимальное количество годовых осадков, которые могут иметь место без стокообразования, т. е. до тех пор пока  $P$  не превышает величины  $P_o$ ,  $Q$  будет равно нулю.

Другая форма зависимости отражает сток в течение заданного периода времени как функцию текущих и предшествующих осадков. Эта зависимость может быть представлена следующим уравнением:

$$Q = aP_1 + bP_2 + \dots + c, \quad (32.5)$$

где  $P_1$  — текущие осадки;  $P_2$  — осадки за предшествующий период;  $a$ ,  $b$  и  $c$  — постоянные. Значения этих постоянных можно определить методом множественной регрессии. Уравнения данного вида можно использовать для периодов различной продолжительности. При этом число членов уравнения, в которые входят значения осадков и значения постоянных, будут изменяться в зависимости от продолжительности выбранного периода. Если это период продолжительностью в один год, и значительная доля запаса воды в бассейне переходит из года в год, то, вероятно, следует ввести в уравнение осадки за предшествующий год, наряду с осадками за текущий год. Если же, с другой стороны, заданный период составляет всего один месяц, может оказаться необходимым использовать данные не за один, а за несколько предшествующих месяцев, чтобы получить надежную зависимость между осадками и стоком. Если рассматриваемый интервал применительно к данным о стоке составляет менее года, например один месяц, то число членов в правой части уравнения и значения постоянных могут меняться в зависимости от сезона.

### 32.3.3 Корреляция между показаниями отдельных станций

Если ряды наблюдений на одних гидрометрических станциях значительно короче, чем на других станциях в данном районе, следует проанализировать эти данные, чтобы сравнить, отличается ли сток за короткий период от среднего стока, рассчитанного за длительный период наблюдений. Одним из способов такого сравнения является использование корреляционных связей между наблюдениями отдельных станций. Например, при подготовке карт годового стока связь средних годовых расходов по двум гидрометрическим станциям покажет, насколько надежной является связь между показаниями этих станций, чтобы оправдать внесение поправки в среднее значение, полученное по короткому ряду. До тех пор пока коэффициент корреляции будет больше 0,8, такая поправка не рекомендуется.

Если при проектировании необходимо использовать данные короткого ряда, его можно привести к более длительному периоду, пользуясь корреляционной зависимостью между месячными расходами станций с короткими и длинными

рядами наблюдений. График связи месячных расходов двух станций даст представление о степени их корреляции. Чтобы использовать данные в широком диапазоне значений, рекомендуется применение логарифмической клетчатки. Каждый месяц должен иметь свой знак, чтобы можно было установить изменения характера связи в зависимости от сезона.

Основные статистические параметры —  $\bar{v}$  (среднее значение) и  $s_v$  (стандартное отклонение) — расходов воды для станции с коротким рядом наблюдений можно оценить на основе собранных на этой станции данных, дополненных наблюдениями по опорной станции с длительным рядом наблюдений. Если принять, что расход  $Q$  подчиняется логарифмически нормальному распределению, можно использовать следующие уравнения:

$$\bar{Q}_y = \exp \left[ \bar{v} + 0,5 s_v^2 \right], \quad (32.6)$$

$$s_{Qy} = \bar{Q}_y \sqrt{\exp(s_v^2) - 1}, \quad (32.7)$$

где

$$\bar{v} = \bar{v}_n + r_{uv} \frac{s_{v_n}}{s_{u_n}} (\bar{u}_N - \bar{u}_n), \quad (32.8)$$

$$s_v^2 = s_{v_n}^2 + r_{uv}^2 \frac{s_{v_n}^2}{s_{u_n}^2} (s_{u_N}^2 - s_{u_n}^2), \quad (32.9)$$

где  $Q_x$  — расход воды на станции с длинным периодом наблюдений;  $Q_y$  — расход воды на станции с коротким периодом наблюдений;  $u = \ln Q_x$ ,  $v = \ln Q_y$ , а:

$\bar{u}_n$ ,  $\bar{u}_N$  — средние значения переменной  $u$ , полученные соответственно на основании  $n$  и  $N$  лет наблюдений;

$\bar{v}_n$  — среднее значение переменной  $v$ , основанное на наблюдениях за  $n$  лет;

$S_{u_n}$ ,  $S_{u_N}$  — средние стандартные отклонения  $u$  на основании  $n$  и  $N$  лет наблюдений;

$s_{v_n}$  — стандартное отклонение  $v$  на основании  $n$  лет наблюдений;

$r_{uv}$  — коэффициент корреляции между  $u$  и  $v$ ;

$n$  — число членов короткого ряда наблюдений;

$N$  — число членов длинного ряда наблюдений.

Параметры  $\bar{Q}_y$  и  $s_{Qy}$  рассчитываются по уравнениям (32.6) и (32.7). Более подробная информация представлена в работе Качмарека *The Estimation and Optimal Use of Surface Water Resources* [4] (Оценка и оптимальное использование поверхностных водных ресурсов).

Корреляция также целесообразна при определении характеристик изменчивости низкого стока. В этом случае используется корреляция между данными о минимальных расходах воды в неизученных створах и суточными расходами воды на ближайшей гидрометрической станции [5]. Когда эти данные наносятся на логарифмическую клетчатку, график связи часто имеет форму прямой линии, пересекающей линию равных значений модуля стока в точке с расходом, несколько превышающим средний годовой сток. Измерения низкого стока, используемые при корреляции, следует проводить в периоды устойчивого стока, по крайней мере несколько дней спустя после выпадения осадков в бассейне.

### 32.3.4 Эффективная продолжительность ряда наблюдений

Существует минимальная степень корреляции между стоком соседних рек или между стоком и осадками, которая может считаться приемлемой для удлинения ряда наблюдений. Чем длиннее ряд наблюдений, тем меньше будет ошибка среднего. Корреляция между двумя рядами данных будет приемлемой, если ошибка за счет корреляции будет ниже погрешности среднего значения, вычисленного по короткому ряду наблюдений.

Был разработан практический тест на проверку обоснованности использования корреляции для удлинения рядов данных, основанный на понятии эффективной продолжительности ряда  $N_e$  [6]. Эффективная продолжительность ряда, состоящего из комбинации фактических и восстановленных значений, определяется в первом приближении по формуле

$$N_e = \frac{N}{1 + \frac{N-n}{n-2} (1 - r^2)}, \quad (32.10)$$

где  $n$  — число лет короткого ряда наблюдений;  $N$  — число лет длинного ряда;  $r$  — коэффициент корреляции. Например, если пятилетний ряд коррелируется с 20-летним рядом, а  $r = 0,8$ , то эффективная продолжительность удлиненного ряда составит 7,1 года, т. е. дополнительный период составит 2,1 года. До тех пор пока  $N_e$  не будет больше чем  $n$ , удлинение ряда неэффективно.

### Список литературы

1. Langbein, W. B., et al., 1949: Annual runoff in the United States. *U.S. Geological Survey Circular* 52.
2. Langbein, W. B., 1962: The water supply of arid valleys in intermountain regions in relation to climate. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, Vol. 7, No. 1, pp. 34-39.

3. Turc, L., 1954: *Le bilan d'eau des sols: relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Troisième journée de l'hydraulique, Alger, 12–14 avril 1954, pp. 36–43. (Résumé de la thèse de l'auteur, Paris, 1953, parue dans *l'Annuaire de l'agronomie*, 1954, et *Sols africains*, Vol. III, 1954).
4. Kaczmarek, Z., 1967: The estimation and optimal use of surface water resources. Fourteenth General Assembly of ATMS (IUGG), *Symposia on Surface Water Resources*, 25 September–7 October 1967, Berne.
5. Hardison, C. H. and Moss, M. E., 1972: Accuracy of low-flow characteristics estimated by correlation of base-flow measurements. *U.S. Geology Survey Water Supply Paper 1542-B*.
6. United Nations Economic Commission for Asia and the Far East/World Meteorological Organization, 1960: *Hydrological Networks and Methods*. Flood control series, No. 15.



## ГЛАВА 33

### ВЗАИМОСВЯЗИ ОСАДКИ—СТОК

#### 33.1       **Общие положения**

[К22]

Зависимости между осадками и стоком прежде всего используются для проектирования, прогнозирования и расчетов. Если данные о речном стоке отсутствуют, или количество их является недостаточным для надежной интерпретации или экстраполяции, большую пользу могут оказать зависимости между осадками и стоком, поскольку они позволяют получить информацию о стоке на основании данных наблюдений за осадками. Поскольку сбор данных о дождевых осадках относительно прост и не требует больших финансовых затрат, этих данных, как правило, имеется гораздо больше, чем данных о стоке. Если для исследуемого водосбора можно установить достаточно тесную связь между осадками и стоком, такая связь в сочетании с данными о дождевых осадках может дать более надежную оценку обеспеченности высокого стока, чем региональная формула по расчету паводка (раздел 36.2) или экстраполяция на основании ограниченных данных о стоке.

Зависимости между осадками и стоком обычно разрабатываются для двух самостоятельных этапов — определения объема стока, который образуется за счет выпадения данного объема осадков в течение данного периода времени, и распределения этого объема стока во времени. Первый этап необходим потому, что нужно расчленить выпавшие дождевые осадки на суммарное испарение (глава 38), инфильтрацию и сток. Второй этап требуется для оценки времени добегания и спада паводочной волны, образуемой при выпадении осадков. Обсуждению этих двух этапов и посвящена данная глава.

#### 33.2       **Объемы стока**

##### 33.2.1      **Индекс предшествующего увлажнения**

Этот метод был разработан, главным образом, для целей прогноза речного стока и широко применяется для различных водосборов и разных условий [1, 2]. Применение его для конкретного бассейна требует наличия данных наблюдений за дождевыми осадками и стоком по большому числу ливней. В качестве необходимых переменных используются: индекс предшествующего увлажнения  $I_p$ , время года, продолжительность ливня, а также слой ливневых осадков, усредненный по площади водосбора. Индекс предшествующего увлажнения определяется по уравнению

$$I_t = I_o k^t + \sum P_i k^{t(i)}, \quad (33.1)$$

где  $I_o$  — начальное значение индекса;  $k$  — коэффициент спада;  $t$  — расчетный интервал времени;  $P_i$  — количество суточных дождевых осадков, выпавших в течение этого интервала времени;  $t(i)$  — соответственно число дней, прошедших после каждого дня с осадками.

Часто для удобства используются упрощенные формы индекса предшествующего увлажнения. В некоторых бассейнах та или иная переменная может иметь настолько незначительное влияние, что ее можно пренебречь и, таким образом, сократить число переменных. Однако в любом случае, основной метод остается тем же.

Влияние растительного покрова, типа почв, а также других более или менее постоянных характеристик водосбора — времени года — учитывается при выборе значения коэффициента спада. Время года отражается семейством кривых, представляющих сезонный ход солнечной энергии, состояния растительности и других факторов, которые оказывают влияние на испарение и транспирацию влаги в бассейне. Индекс предшествующего увлажнения является показателем количества влаги на водосборе и в почве. Как правило, коэффициент спада для суток принимается равным 0,9, о чем свидетельствует рисунок 33.1, представленный ниже. Индекс предшествующего увлажнения может быть рассчитан на базе среднего

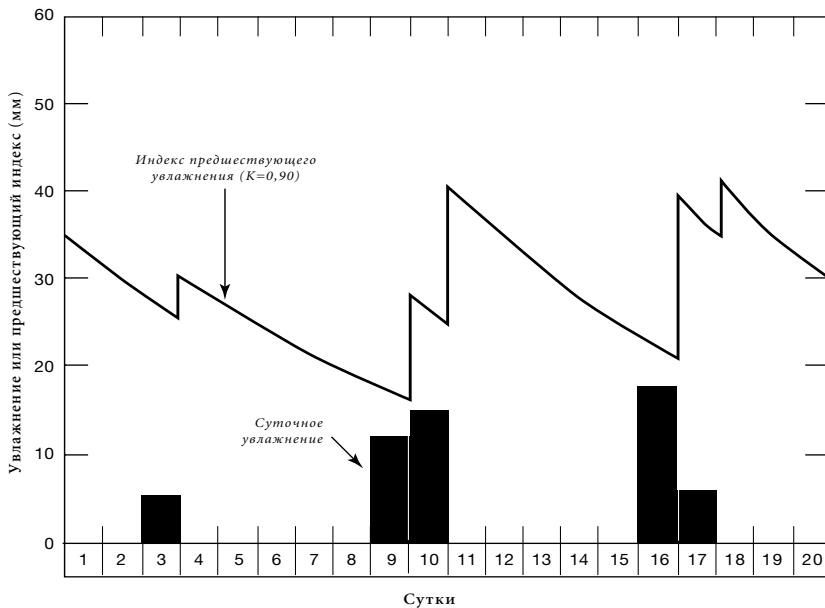


Рисунок 33.1 — Индекс предшествующего увлажнения

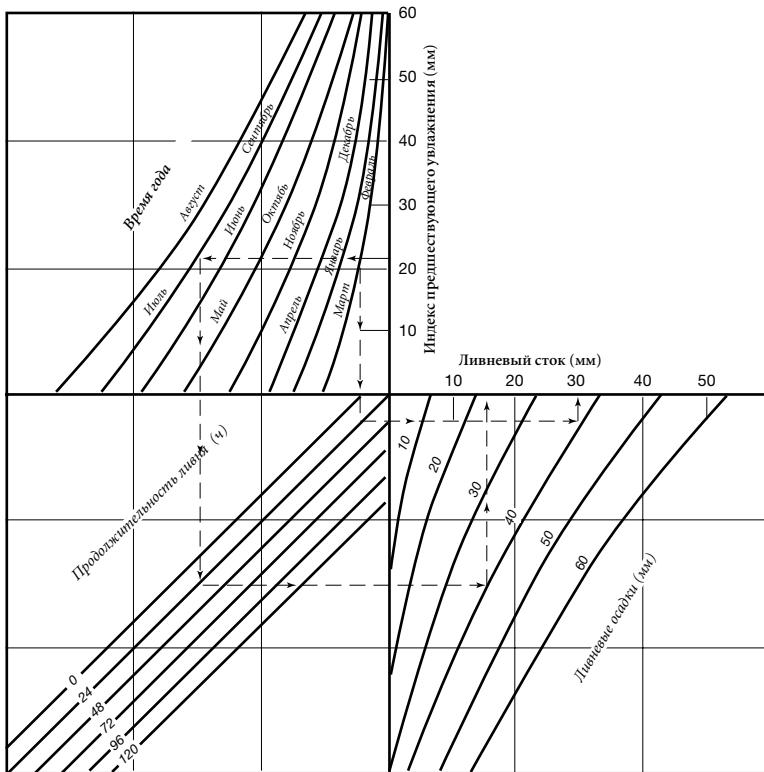


Рисунок 33.2 — Метод индекса предшествующего увлажнения для расчета дождевого стока

количества осадков для нескольких станций или индивидуально для каждой станции в водосборе. Последний метод в большинстве случаев наиболее предпочтителен.

Рисунок 33.2 иллюстрирует метод оценки объема стока по ливневым осадкам и индексу предшествующего увлажнения. Пунктирными линиями и стрелками показано, как пользоваться этим графиком. Например, график начинается с величины 22 миллиметра для индекса предшествующего увлажнения. Длинные штрихи и стрелки приводят к июлю месяцу, а затем идут вниз к прямой линии, соответствующей ливню продолжительностью в 24 часа. Затем они идут вправо до линии, соответствующей ливню в 40 миллиметров, и затем вверх до пересечения со шкалой в точке, соответствующей среднему слою стока с водосбора, равному 16 миллиметрам.

Если предположить, что гипотетический ливень в предыдущем примере прошел в феврале, то при прочих равных условиях влияние предшествующего увлажнения, равного 22 миллиметрам, будет другим. Обычно в феврале, в отличие от июля, та же самая степень предшествующего увлажнения ведет к большему насыщению почвы, потому что растительность находится в состоянии покоя, а суммарное испарение зимой ниже. Короткие штрихи и стрелки на рисунке 33.2 показывают, что сток, образованный ливнем в 40 миллиметров, во втором примере составит 30 миллиметров.

При наличии мерзлой почвы и снежного покрова к оценке предшествующего увлажнения требуется специальный подход. В случае мерзлой почвы обычно используется кривая времени года, которая дает максимальный сток. Влияние снежного покрова на почву выражают через объем талой воды и интенсивность снеготаяния, а не через общее (суммарное) количество накопленного снега. Проблема снеготаяния рассматривается в главе 31.

### 33.2.2 Исходный базисный сток как показатель объема стока

Во влажных районах, где реки пересыхают редко, базисный сток (т. е. сток грунтовых вод) на начало ливня часто используется как показатель начальной увлажненности бассейна. Пример такой зависимости показан на рисунке 33.3. Базисный сток отражает условия увлажненности всего бассейна. Для некоторых районов необходимо строить такие зависимости для отдельных сезонов. Обычно в этом случае разрабатывается одна зависимость для лета и другая — для зимы, что

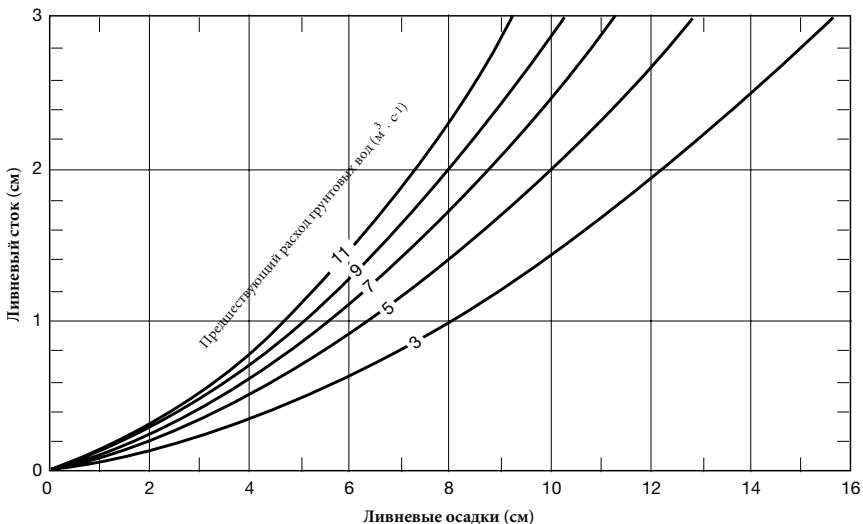


Рисунок 33.3 — Базисный сток как показатель взаимосвязи осадки—сток

приводит к неизбежной проблеме оценки стока ливневых осадков, выпадающих в межсезонье. Обычным решением этой проблемы является оценка стока по каждой кривой, а затем интерполяция полученных результатов.

Использование базисного стока грунтовых вод в качестве показателя условий стока, ограничивается обычно малыми бассейнами с малым временем добегания. На более крупных бассейнах в период сезона дождей один подъем гидрографа накладывается на предыдущий, что значительно затрудняет определение исходного расхода грунтовых вод. Обычно определяют исходный расход грунтовых вод для малых водосборов, а затем используют его для других, близко расположенных территорий, имеющих аналогичные гидрологические характеристики.

### 33.2.3 *Методы, учитывающие влажность почвы*

Дефицит влажности почвы является, пожалуй, самым важным фактором, включаемым в зависимость между осадками и стоком. Пригодные для практического использования средства оценки начального дефицита влажности почвы для всей площади дали бы возможность получить очень полезную переменную для включения ее в корреляционные связи ливневых осадков с образуемым стоком. Приборы для измерения влажности в отдельных слоях почвы получили широкое практическое применение (глава 15), однако большое разнообразие типов почв и условий увлажнения, существующее даже в пределах малого водосбора, ставит под сомнение надежность определения объемов почвенной влаги в зависимостях между осадками и стоком, полученных с использованием точечных измерений влажности.

Более перспективным подходом является использование метода площадной оценки, позволяющего получать значения влажности почвы для всей изучаемой территории. При таком подходе осадки являются приходным элементом баланса, а расходными являются сток, стекающий с изучаемой площади по речным руслам, плюс суммарное испарение с поверхности почвы и растительного покрова. Определение осадков по площади является обычной проблемой получения среднего по площади их значения по данным точечных наблюдений. Слой стока с территории можно определить по данным наблюдений. Таким образом, проблема сводится к тому, чтобы сбалансировать сток и ливневые осадки, вызвавшие этот сток (раздел 33.3.1.1). Разность осадки минус сток представляет собой то количество воды, которое остается в бассейне и идет на пополнение запасов влаги  $R_c$ .

Третий элемент — суммарное испарение — является наиболее сложным из-за чрезвычайной трудности его непосредственного измерения (раздел 9.1). Большинство методов оценки влажности почвы основаны на предпосылке, что действительное суммарное испарение находится в простой зависимости с потенциальным суммарным испарением  $E_{Tp}$  и дефицитом влажности почвы.

Наиболее простым подходом к оценке влажности почвы является такой, когда водоудерживающая способность почвы  $S$ , определенная по почвенному

профилю, принимается для всей площади бассейна. В этом случае дефицит влажности почвы  $DU_s$  определяется по уравнению

$$DU_s(t+1) = DU_s(t) - R_c + E_T \quad (33.2)$$

где  $DU_s(t)$  — дефицит влажности почвы в момент времени  $t$ ;  $DU_s(t+1)$  — его значение через один расчетный интервал;  $R_c$  — пополнение запасов почвенной влаги и  $E_T$  — суммарное испарение за период времени между  $t$  и  $t+1$ . Принимается, что дефицит влажности почвы может изменяться в пределах от нуля до  $S$ . Данный подход будет более реалистичным, если суммарное испарение умножить на отношение  $(S - DU_s(t))/S$ , характеризующее уменьшение действительного суммарного испарения по мере уменьшения запасов влаги в почвенном профиле.

Другой возможностью улучшения методики является разделение почвенного профиля на отдельные слои. При таком подходе принимается, что влага в верхнем слое должна истощаться прежде, чем это произойдет в нижележащих слоях и, следовательно, пополнение влагой нижнего слоя ограничено поступлением в него влаги из верхнего слоя.

Применимость полученных оценок запасов почвенной влаги в зависимостях осадки—сток может быть подтверждена путем сопоставления значения суммарного стока  $Q$  с расходами, рассчитанными по соотношению

$$Q = cQ_U + (1 - c) Q_L \quad (33.3)$$

где  $c$  — постоянная;  $Q_U$  — сток, рассчитанный для верхнего слоя; а  $Q_L$  — сток, рассчитанный для нижнего слоя.

### 33.3 Распределение речного стока во времени

Чтобы рассчитать время дебегания и распластывание паводочной волны от выпадающих на поверхность водосбора осадков, необходимо провести оценки во времени поступления воды к замыкающему створу. Для этого обычно строится единичный гидрограф, который характеризует распределение во времени стекающей с водосбора воды. Единичный гидрограф основан на использовании закона неразрывности массы в следующей форме:

$$V = \int Q(t) dt, \quad (33.4)$$

где  $Q(t)$  — мгновенный расход;  $t$  — время;  $V$  — объем стока. Функция  $Q(t)$  определяет вид кривой, форма которой наиболее верно отражает характеристики водосбора. Для сопоставления гидрографов, полученных для разных водосборов и содействия в построении синтетических гидрографов, были разработаны детерминированные модели, которые устанавливают связь между характеристиками гидрографов и гидрологическими и метеорологическими данными. Эти модели рассматриваются ниже.

### 33.3.1      *Единичный гидрограф*

Под единичным гидрографом для водосбора понимается гидрограф стока, сформированный за счет единичной порции стока (или другого элемента), равномерно распределенного по водосбору (или согласно иному специальному распределению) в течение заданного периода времени. Принимается, что единичный гидрограф неизменен во времени. Далее принимается, что в том случае, когда объемы стока отличаются от того объема, который был принят при построении единичного гидрографа, результирующие гидрографы будут пропорциональны единичному гидрографу.

#### 33.3.1.1    *Построение единичного гидрографа по гидрометрическим данным*

Чтобы определить объем стока, сформированного отдельным ливнем, необходимо расчленить гидрограф на отдельные составляющие. Одна из составляющих — это полный (или ливневой) сток, сформированный данным ливнем. Другая важная составляющая — сток, обусловленный предыдущими поступлениями воды на водосбор. Третья важная составляющая — сток от непосредственного ливня, который, просочившись через почву, поступил к замыкающему створу с запозданием. Основная доля этой третьей составляющей известна как внутриводосточный сток, т. е. вода, просочившаяся через почву с незначительной задержкой. Этот сток часто рассматривают как часть прямого стока. Некоторые из последних концептуальных моделей гидрографа стока обеспечивают расчет каждой из вышеуказанных составляющих в отдельности.

При таком типе анализа невозможно выделить каждую из нескольких составляющих путем расчленения гидрографа, полученного по данным наблюдений. При использовании более простых методов анализа, в которых рассматриваются только две составляющие, расчленение наблюденного гидрографа и оценка величины каждой составляющей оказываются вполне возможными. В приводимом ниже примере прямой сток включает в себя поверхностный и внутриводосточный сток.

Один из простейших методов расчленения гидрографа на основные составляющие представлен на рисунке 33.4. Линия базисного стока экстраполируется (участок  $AB$ ) до момента наступления пика паводка по тенденции, характерной для базисного стока в период, предшествующий подъему уровня в реке. От точки  $B$  проводится прямая линия до пересечения с гидрографом в точке  $C$  через определенный отрезок времени. Продолжительность периода (сутки), ограниченного точками  $B$  и  $C$  зависит, главным образом, от размера площади водосбора. Как правило она составляет  $(A/2)^{0,2}$ , где  $A$  — площадь водосбора в квадратных километрах.

На практике обычно используются несколько методов расчленения гидрографа. Однако более важным, чем используемый метод, является требование, чтобы на практике применялась та же методика, что и при разработке метода.

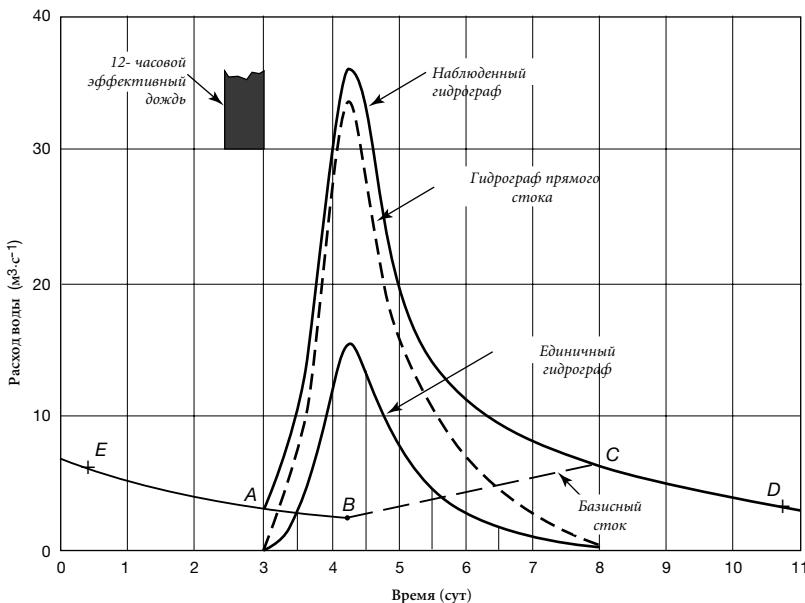


Рисунок 33.4 — Анализ гидрографа

Суммарный сток, обусловленный каким-либо отдельным ливнем или ливневым дождем, может быть определен с помощью следующего метода. На рисунке 33.4 площадь гидрографа в пределах временных абсцисс *E* и *C* представляет собой ливневый сток, так как начальные и конечные абсциссы характеризуют одни и те же условия истощения грунтовых вод и поэтому одни и те же запасы воды в начале и конце расчетного периода.

Рисунок 33.4 иллюстрирует необходимые этапы построения единичного гидрографа прямого стока по данным наблюдений. Это можно делать графически либо расчетным путем. Гидрограф прямого стока располагается выше линии *ABC*. Объем прямого стока получается путем определения площади гидрографа над линией *ABC*. При отсутствии планиметра можно использовать палетку. В данном гипотетическом примере объем прямого стока оказывается равным 4 320 000 м<sup>3</sup>. При площади водосбора в 200 км<sup>2</sup> этому объему будет соответствовать слой стока в 2,16 см. Для построения единичного гидрографа каждую ординату гидрографа прямого стока необходимо разделить на 2,16. Полученный таким образом гидрограф будет иметь такую же форму, которую бы имел гидрограф прямого стока для слоя стока в 1 см, т. е. единичный гидрограф.

При наличии данных наблюдений по нескольким водосборам выделить отдельный или единичный ливень, приводящий к повышению уровня воды в реке,

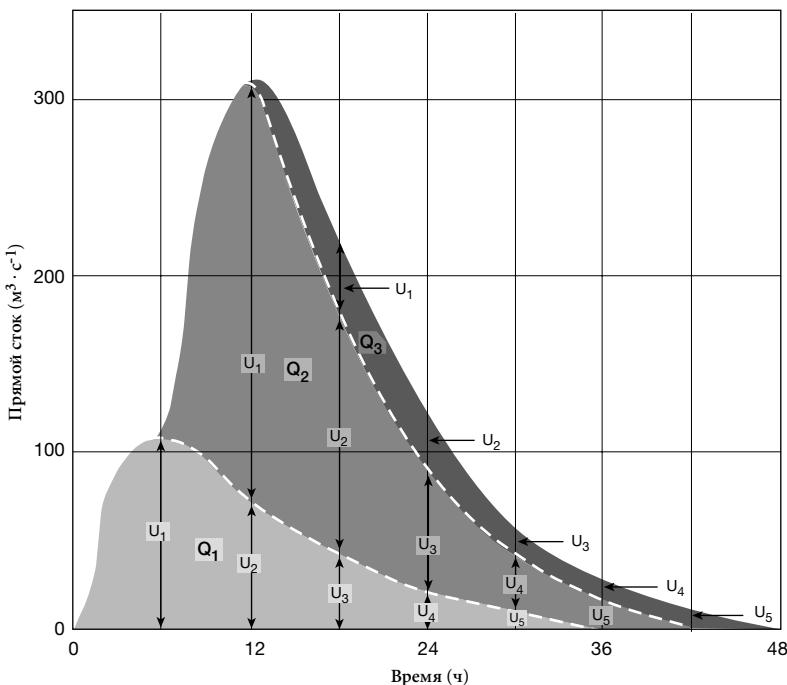


Рисунок 33.5 — Построение гидрографа прямого стока

достаточно трудно. В таких случаях построение единичного гидрографа усложняется. Одним из методов построения единичного гидрографа в подобных условиях является произвольное задание исходного единичного гидрографа, реконструкция гидрографов прямого стока для нескольких ливней с использованием данных наблюдений и уточнение единичного гидрографа путем последовательных приближений. Такой метод реконструкции показан на рисунке 33.5. Для расчета используется уравнение

$$q_n = Q_n U_1 + Q_{n-1} U_2 + Q_{n-2} U_3 + \dots + Q_{n-i+1} U_i + \dots + Q_1 U_n, \quad (33.5)$$

где  $q_n$  — прямой сток (расход воды) за время  $n$ ;  $U_n$  — ордината  $n$ -го единичного гидрографа; и  $Q_{n-i+l}$  — прямой сток за  $i$ -й интервал времени. Это уравнение можно также использовать в качестве регрессионной модели для расчета единичного гидрографа с использованием метода наименьших квадратов.

Для водосборов меньшей площади могут также потребоваться более короткие интервалы времени. Временные интервалы должны быть настолько короткими,

чтобы обеспечить надежное описание формы гидрографа и дать прогноз без потери лишнего времени. Для водосборов площадью более 2 000 км<sup>2</sup> можно использовать единичные гидрографы с большей расчетной единицей времени; но, вообще, расчеты единичных гидрографов сначала следует осуществлять для притоков, а затем объединять результаты с учетом трансформации стока русловой системой.

С точки зрения русловой гидравлики можно полагать, что существует тенденция увеличения заостренности единичных гидрографов с увеличением стока. Соответственно при практических расчетах для отдельного водосбора можно использовать семейство единичных гидрографов, когда гидрографы с более высокими пиками будут наблюдаться при больших объемах стока, а с более слаженными пиками — при меньших объемах. Часто семейство бывает представлено лишь двумя формами гидрографов.

Искусство применения единичных гидрографов требует теоретической подготовки и практического опыта. Описание подобных и более совершенных методов, которые не вошли в данный раздел, можно найти в учебниках и пособиях тех агентств, где использование единичных гидрографов является повседневной практикой.

**33.3.1.2 Построение единичного гидрографа с помощью синтетических методов**  
 Часто возникает необходимость планировать сооружение или эксплуатацию объектов на неизученных реках. В таких случаях целесообразно построение синтетических единичных гидрографов [3, 4]. Процедура построения единичного гидрографа, разработанная Снайдером [5], основана на анализе большого числа бассейнов и единичных гидрографов с целью получения зависимостей между формой единичного гидрографа и объективными физическими характеристиками водосбора.

Наиболее важными параметрами формы единичного гидрографа являются его заостренность, длина основания, а также время добегания, которое может иметь много толкований, однако в данном случае под ним понимается время между геометрическим центром графика осадков и пиком паводка. По методу Снайдера время добегания  $t_p$  определяется по следующей формуле:

$$t_p = C_1 (l l_c)^n, \quad (33.6)$$

где  $C_1$  — эмпирический коэффициент;  $l$  — длина главной реки, км;  $l_c$  — расстояние от центра тяжести водосбора до замыкающего створа, км; и  $n$  — постоянная, определяемая эмпирическим путем.

Для определения этим методом максимальной ординаты единичного гидрографа используется стандартная продолжительность дождя  $t_p/C_2$ , где  $C_2$  находится эмпирически. Для дождевых осадков такой продолжительности

$$Q_p = C_3 A / t_p, \quad (33.7)$$

где  $Q_p$  — максимальная ордината единичного гидрографа,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $C_3$  — эмпирическая постоянная;  $A$  — площадь водосбора,  $\text{км}^2$ ;  $t_p$  — время добегания, ч. Основание гидрографа  $T_b$ , сут, вычисляется по формуле

$$T_b = d + C_4 t_p. \quad (33.8)$$

Постоянные  $d$  и  $C_4$  определяются по методике, используемой при выделении базисного стока из прямого стока.

При продолжительности дождя  $T_R$ , отличной от стандартной, время добегания  $t_c$  определяют по выражению

$$t_c = t_p + f(T_R), \quad (33.9)$$

где  $f(T_R)$  — функция продолжительности дождя.

Коэффициенты, используемые в расчетных формулах, были получены Снайдером для рек района Аппалачских гор в США. Метод оказался приемлемым и для других регионов, однако для иных типов рельефа, геологического строения и климатических условий коэффициенты будут другими.

### 33.3.1.3      *Пересчет единичного гидрографа для различной продолжительности дождя*

Идеальные дожди продолжительностью в единицу времени наблюдаются редко. Неравномерность осадков во времени и в пространстве обуславливает разные гидрографы, даже если суммарный объем и продолжительность ливня совершенно одинаковы. Таким образом, обобщенный единичный гидрограф определяется путем усреднения нескольких единичных гидрографов.

Один из способов обобщения единичных гидрографов заключается в сопоставлении графиков единичных гидрографов разной продолжительности. Если ординаты единичного гидрографа продолжительностью в  $t$  часов сложить с ординатами того же самого гидрографа, сдвинутого на  $t$  часов, а ординаты разделить на два, то в результате получим единичный гидрограф продолжительностью  $2t$  часов. Такие преобразования очевидны.

В более широком смысле применение этой основной идеи по пересчету единичных гидрографов известно как метод суммирования, или метод S-кривой. Эта интегральная кривая представляет собой гидрограф, который можно было бы получить при непрерывном приращении стока в один сантиметр за  $t$  часов. Интегральная кривая строится путем сложения ряда единичных гидрографов, каждый из которых сдвинут на  $T$  часов по отношению к предыдущему. Если основание единичного гидрографа равно  $T$  часам, то непрерывный ливень, дающий один сантиметр прямого стока за  $t$  часов, приведет к установлению

постоянного значения стока к концу периода, равного  $T$  часам. Таким образом, для построения S-кривой уравненного стока потребуется  $T/t$  часов.

Построение S-кривой может быть выполнено не только графически, но и в табличной форме. Единичный гидрограф для любой продолжительности осадков  $t$  можно получить путем сдвига S-кривой на  $t$  часов и вычисления разности сдвинутых и несдвинутых S-кривых. Для получения единичного объема эти разности следует умножить на отношение продолжительности осадков исходного единичного гидрографа к искомой продолжительности единичного гидрографа.

Мгновенный единичный гидрограф представляет собой не что иное, как единичный гидрограф, единица времени которого  $t$  бесконечно мала. Построение единичного гидрографа для осадков продолжительностью  $t$ -часов по мгновенному гидрографу производится с помощью S-кривой.

### 33.3.2 Метод изохрон

Метод изохрон является отражением одной из первых концепций о формировании стока с бассейна. Сток с разных участков бассейна достигает замыкающего створа в разное время. Сначала стекает вода, которая при подъеме уровня в реке поступает в нее с участков, расположенных вблизи замыкающего створа. Затем поступает вода с более удаленных участков в центре бассейна и, наконец, с самых отдаленных участков. Таким образом, площадь бассейна может быть разделена на зоны, с которых происходит последовательное поступление воды к замыкающему створу. Линии, разграничитывающие эти зоны на рисунке 33.6(a), называются изохронами. Распределение межизохронных зон (как по времени добегания, так и по площади) принимается постоянным для данного бассейна для всех паводков.

Чтобы определить функцию распределения, необходимо сначала рассчитать или задать среднее время добегания или среднюю скорость стекания и в соответствии с этим построить карту изохрон в бассейне. Затем с помощью планиметра определяется площадь каждой зоны, и полученные величины наносятся на график для соответствующих значений времени добегания (рисунок 33.6(b)).

Такое пространственно-временное распределение является отражением гидрографа стока при равномерном ливне единичной продолжительности,  $\Delta t$  — разница во времени между изохронами. При нескольких периодах ливней, каждый из которых дает разное количество стока с разных зон, используется формула

$$Q_t \Delta t = A_1 V_t + A_2 V_{t-1} + A_3 V_{t-2} + \dots + A_c V_{t-c+1}, \quad (33.10)$$

где  $Q_t$  — средний расход воды за период  $\Delta t$ , кончающийся в момент времени  $t$ ;  $V_t$  — зональный сток в течение этого же периода. При этом необходимо обеспечить совместимость единиц. На рисунке 33.6 (c) приводится расчет результирующего гидрографа при трех периодах равномерного стока по бассейну.

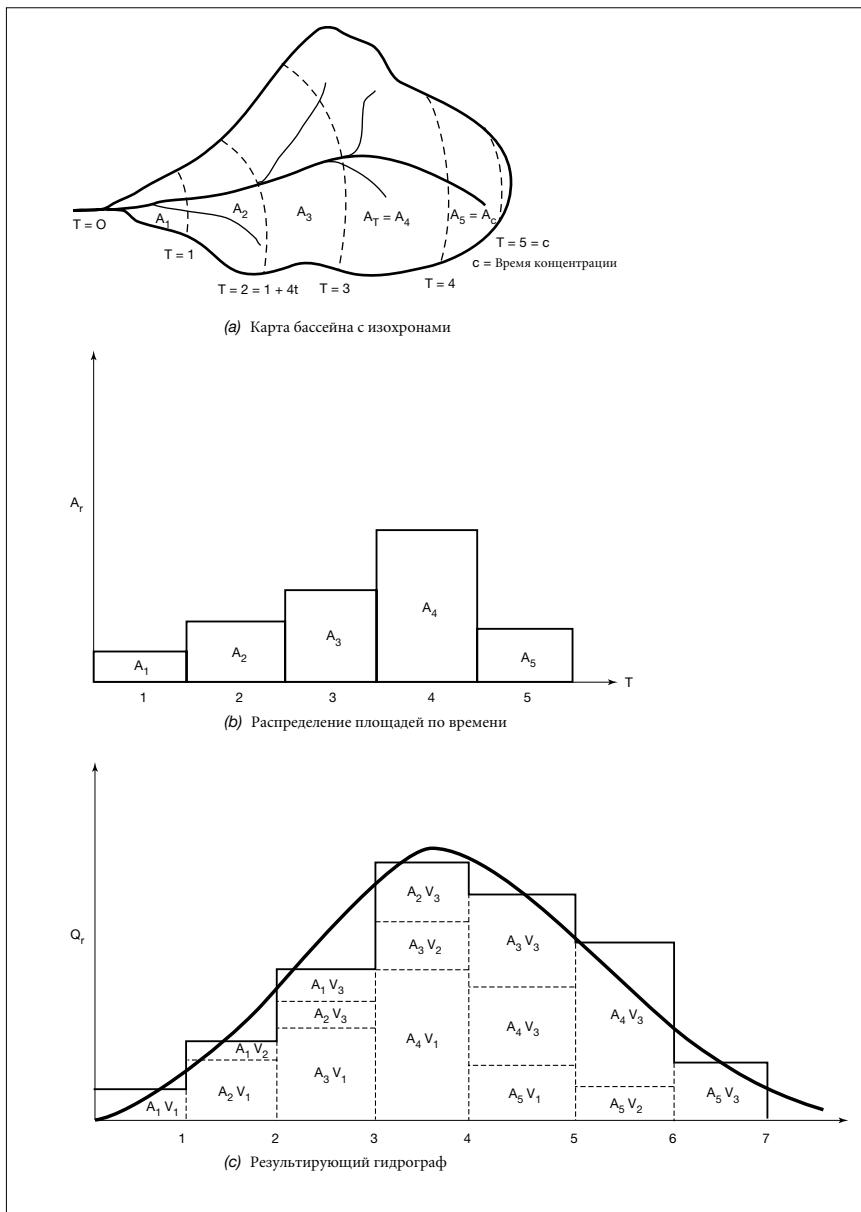


Рисунок 33.6 — Метод изохрон

Полученный гидрограф соответствует характеристикам добегания с водосбора. Поскольку фактический гидрограф подвержен влиянию регулирующей русловой емкости, то гидрограф, рассчитанный по уравнению (33.10), должен быть трансформирован. Для этого можно использовать любой известный метод, описанный в литературе. В главе 34 описываются два таких метода. Чтобы получить наиболее удачную комбинацию при моделировании наблюденных гидрографов, обычно, при подгонке изохрон и трансформационных параметров, предпочтение отдают методу проб и ошибок.

Метод изохрон позволяет учесть неравномерное распределение дождевых осадков в том случае, когда число установленных в бассейне осадкометров является достаточным для надежного описания хода дождя. Это является преимуществом по сравнению с методом единичного гидрографа, представленным в разделе 33.3.1.

### 33.4 Модели с распределенными параметрами

В последние годы были разработаны более совершенные модели по сравнению с упоминавшимися ранее. Они предназначены для более надежного описания природных гидрологических процессов и поэтому могут включать некоторые метеорологические переменные и параметры водосбора. Эти модели позволяют получать ряды данных о поверхностном стоке и, иногда, — о расходах грунтовых вод. Основными входными данными в таких моделях являются ряды по дождевым осадкам, но могут использоваться данные о снегозапасах, температуре, радиации, потенциальном суммарном испарении и т. д. Модели для урбанизированных водосборов могут включать описание дренажной сети. Модели для водосборов, подверженных сельскохозяйственному использованию, могут включать единичные гидрографы, распределения площадей по времени добегания или кривые трансформации стока.

### Список литературы

1. Linsley, R. K., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H., 1949: *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
2. Linsley, R. K., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H., 1958: *Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill, New York.
3. Linsley, R. K., 1943: Application of synthetic unit-graphs in the western mountain states. *Transactions*, American Geophysical Union, Vol. 24, Part 2, pp. 580-586.
4. Taylor, A. B. and Schwarz, H. E., 1952: Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Transactions*, American Geophysical Union, Vol. 33, pp. 235-246.
5. Snyder, F. F., 1938: Synthetic unit hydrographs. *Transactions*, American Geophysical Union, Vol. 19, Part 1, pp. 447-454.

## ГЛАВА 34

### ТРАНСФОРМАЦИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ В РУСЛОВОЙ СЕТИ

#### 34.1        **Общие положения**

[K35, K45]

Движение воды с верховьев реки вниз по течению происходит в виде волны, изменяющаяся конфигурация которой в разных створах может быть вычислена методом, известным под названием «трансформация паводочной волны». Регулирующая емкость русла и другие факторы вызывают распластывание волны. Изменяющийся характер русла и поступление воды с притоков усложняют проблему. Расчет трансформации паводочных волн при их движении по руслам и водохранилищам производится различными методами, которые основаны на решении уравнений неразрывности и энергии (уравнения Сен-Венана):

$$A \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q, \quad (34.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v \cdot q}{A} = g(s - s_f), \quad (34.2)$$

где  $t$  — время;  $x$  — расстояние по направлению течения потока;  $A$  — площадь поперечного сечения;  $v$  — средняя скорость в поперечном сечении  $A$  по направлению  $x$ ;  $q$  — приращение бокового притока на единицу длины  $x$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $h$  — средняя глубина воды;  $s$  — продольный уклон русла;  $s_f$  — коэффициент трения.

Эти уравнения служат основой всех методов расчета трансформации паводочной волны при ее движении по руслу и через водохранилище. Для расчета трансформации паводочной волны в руслах рек существуют две основные группы методов — гидродинамические методы и гидрологические методы. Для расчета снижения паводка водохранилищем существуют более упрощенные модели.

#### 34.2        **Гидродинамические методы**

##### 34.2.1      **Полный метод**

С помощью метода полного динамического расчета трансформации, который учитывает эффект наращивания скорости течения и уклон водной поверхности, можно надежно определить расходы воды и уровни водной поверхности для следующих случаев неустановившегося движения воды:

- a) движение волн вверх по течению под влиянием таких воздействий, как приливы или штормовые нагоны с моря;
- b) явление подпора воды за счет расположенного ниже водохранилища или впадения притока;
- c) типичные паводочные волны на равнинных реках с незначительным уклоном дна, менее 0,05 %;
- d) прерывные волны, вызываемые сбросами воды из водохранилища в процессе его эксплуатации или возникающие при катастрофическом прорыве плотины.

Динамический расчет основан, как правило, на решении одномерных гидродинамических уравнений неустановившегося движения, известных как уравнения Сен-Венана. Эти уравнения, приведенные выше, как правило выражены в своей консервативной форме и используются в виде:

уравнения неразрывности

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} - q = 0, \quad (34.3)$$

уравнения энергии

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2 / A}{\partial x} + gA \frac{\partial h_y}{\partial x} + S_f - qv_x + W_f B = 0, \quad (34.4)$$

в котором:

$$S_f = \frac{n^2 Q}{A^2 R^{4/3}}, \quad (34.5)$$

$$W_f = C_w V_w \cos \omega, \quad (34.6)$$

где  $Q$  — расход;  $A$  — площадь живого сечения;  $A_0$  — площадь поперечного сечения реки или водохранилища при мертвом объеме;  $h_y$  — уровень водной поверхности;  $v_x$  — скорость потока в направлении координаты  $x$ ;  $B$  — ширина потока в живом сечении;  $n$  — коэффициент шероховатости Маннинга;  $R$  — гидравлический радиус;  $W_f$  — эффект ветра;  $C_w$  — коэффициент ветра;  $V_w$  — скорость ветра;  $\omega$  — угол, образованный направлением ветра и осью  $x$  реки; прочие условные обозначения объяснены выше.

Численные методы решения частных дифференциальных уравнений, уравнений (34.3) и (34.4) для рек с ненарушенным режимом, можно подразделить на две основные категории методов: явные и неявные. Самым известным явным методом является метод характеристик. В наши дни, однако, он широко не применяется. Существуют также явные и неявные методы конечных разностей. Различным методам присущи свои преимущества и недостатки. Необходимо учитывать также такие факторы, как устойчивость решений и сходимость, требуемое время для расчетов и объем памяти ЭВМ, степень сложности программирования и математического обеспечения. Некоторые методы перед их использованием требуют модификации уравнений (34.3) и (34.4).

В целом, неявные методы конечных разностей [1, 2] являются более сложными, но и более эффективными по сравнению с явными методами при расчете неустановившегося движения воды для периода в несколько суток. Явные методы можно использовать для более продолжительных интервалов времени. Явные методы просты, однако связаны с проблемами устойчивости решений, если не совсем правильно выбран временной интервал. Эти и другие возможные ограничения следует тщательно взвесить прежде, чем выбрать какой-либо определенный подход для решения прогнозных задач расчета трансформации или при выборе существующего динамического метода для конкретного случая.

Наиболее сложной задачей в случае применения динамического метода расчета трансформации при прогнозе реальной ситуации является определение параметра шероховатости, характеризующего сопротивление ложа  $S_f$  в уравнении (34.5). Параметр шероховатости часто изменяется в зависимости от расхода, уровня, а также по длине реки. Эта важная проблема рассматривается в работе Американского общества гражданских инженеров *Friction Factors in Open Channels* [3](Факторы трения в открытых руслах), в работе Рауза *Critical Analysis of Open-channel Resistance* [4](Критический анализ сопротивлений в открытых руслах), а также в работе Саймонса и Сенторка *Sediment Transport Technology* [5](Технология переноса наносов); методы оценки коэффициента шероховатости по полевым измерениям описаны Лимериносом в его работе *Determination of the Manning Coefficient from Measured Bed Roughness in Natural Channels* [6](Определение коэффициента Маннинга по измеренной шероховатости речного дна в естественных руслах) и Хеем в работе *Flow Resistance in Gravel-bed Rivers* [7](Сопротивление потока в реках с гравийным дном); наглядные сравнительные примеры по данному вопросу представлены Вен Те Чоу в его работе *Open Channel Hydraulics* [8] (Гидравлика открытого русла) и Барнесом в работе *Roughness Characteristics of Natural Channels* [9](Характеристики шероховатости естественных русел). Прежний способ определения параметра шероховатости по графическим зависимостям от расхода воды и расстояния методом подбора является очень трудоемким. Методика автоматического определения такой связи значительно облегчает оперативное использование метода динамического расчета трансформации при прогнозе изменений в окружающей среде. Правильная оценка граничных и начальных условий при решении уравнений Сен-Венана в оперативном режиме является, вероятно, самой важной задачей при применении динамического метода расчета трансформации.

Другой важной задачей является создание эффективной системы сбора и обработки данных, используемых в расчетах. Геометрия поперечного сечения должна быть представлена как можно более детально для последующего использования при динамических расчетах трансформации. Движение воды должно описываться как можно меньшим количеством входных данных при применении метода динамического расчета трансформации, чтобы их можно было использовать при оперативном прогнозировании.

### 34.2.2 Диффузия и кинематический расчет

Если немного изменить уравнение количества движения и пренебречь влиянием ветра и количеством движения за счет боковых притоков, можно получить очень ясную картину, которая показывает основные различия между динамическим, диффузионным и кинематическим расчетом трансформации.

Рассмотрим:

$$\left| \frac{I}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \right| + \frac{\partial h}{\partial x} - S_o + S_f = 0, \quad (34.7)$$

The diagram illustrates the decomposition of the momentum balance equation (34.7) into three models. It shows the original equation on the left, followed by a plus sign, and then a bracketed term  $\frac{\partial h}{\partial x}$ . To the right of the bracket is the equation  $-S_o + S_f = 0$ . Three arrows point from the right side of the equation to the right, each labeled with a model name: 'кинематическая модель' (kinematic model), 'диффузионная модель' (diffusion model), and 'динамическая модель' (dynamic model).

где новыми переменными являются:  $v$  — средняя скорость в поперечном сечении в направлении  $x$ ;  $h$  — глубина;  $S_o$  — уклон дна.

При первом уровне приближения членами уравнения, представляющими ускорение, относящееся к временным изменениям притока и к пространственному изменению скорости, пренебрегают. Получаемая в результате модель рассматривается как диффузионная модель. В некоторых случаях можно пренебречь также членом, характеризующим силу давления и рассматривать уравнение количества движения как баланс между силами тяжести и трения. Такая аппроксимация известна как кинематическая модель. В работе [10] показано, что аппроксимация в конечных разностях модели кинематической волны совпадает с методом Маскингама (раздел 34.3).

Как кинематическая, так и диффузионная аппроксимация успешно используются в последние годы для описания склоновых и русловых потоков в тех случаях, когда уклоны превышают приблизительно 0,1 %. Диффузионную модель можно использовать на реках с меньшими уклонами, однако с осторожностью, т. к. инерционные члены уравнения могут стать значимыми. В последние годы кинематическая модель приобрела большую популярность применительно к тем случаям, когда русло неправильной формы и рельеф природных водосборов могут быть представлены в виде ряда простых элементов, таких, как участки с однородными условиями стока и участки русла правильной формы. Кинематические уравнения также используются в моделях качества воды для прогноза переноса растворимых и нерастворимых загрязняющих веществ. Кинематическая модель не учитывает влияние подпора за счет поступления воды из боковых притоков или от нижерасположенного водохранилища; эту модель нельзя использовать для прогноза распространения волны вверх по течению.

### 34.3 Гидрологические методы

Помимо методов, использующих оба уравнения Сен-Венана, существуют несколько методов, в которых используется только уравнение неразрывности. При этом исследуется только волна распространения посредством рассмотрения увеличения и

уменьшения объема воды на участке, расположенному между двумя пунктами измерений. Гидрологическая модель более простая, с ее помощью легче учитывать дополнительное поступление воды от различных источников. Однако из-за того что при использовании этих методов связь между объемом воды и стоком устанавливается эмпирически, их нельзя использовать в тех случаях, когда данные о стоке и уровнях воды необходимы для целей проектирования.

При использовании гидрологических методов определяется сток в верхнем створе и трансформация используется для расчета стока и уровня в нижнем створе. Эта трансформация заключается в решении следующего уравнения посредством использования связи между объемом воды и стоком:

$$Idt - Qdt = dS, \quad (34.8)$$

где  $I$  и  $Q$  — расходы соответственно в верхнем и нижнем створах;  $S$  — объем воды на участке;  $t$  — время. Решение этого уравнения включает аппроксимацию связи объем—сток, что создает основную трудность в расчетах.

Многие практические методы расчета трансформации основаны на использовании следующего уравнения:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t = S_2 - S_1, \quad (34.9)$$

где индексы 1 и 2 обозначают начало и конец расчетного интервала времени  $\Delta t$ . Этот временной интервал или период трансформации стока не должен превышать время добегания воды на участке. Как правило, период трансформации не должен быть больше половины времени добегания. При достаточном количестве гидрометрических данных зависимость между объемом и стоком можно получить эмпирически.

Простейшие методы расчета трансформации паводочной волны основаны на допущении о линейной зависимости между объемом и стоком, что дает возможность получить аналитические решения. В практике краткосрочных прогнозов применимы такие два метода:

- a) метод Маскингама, предложенный Маккарти [11]:

$$Q_2 = C_o I_2 + C_1 I_1 + C_2 Q_1, \quad (34.10)$$

основанный на следующей зависимости между объемом и стоком:

$$S = K [x Q_1 + (1 - x) Q_2]. \quad (34.11)$$

Постоянные  $K$  и  $x$  определяются эмпирически для изучаемого участка реки по данным о расходах воды. Постоянная  $K$  представляет собой отношение объема к расходу. Она приблизительно равна времени добегания воды на участке. Значения  $K$  и  $x$  определяются с помощью графика связи  $S$  с величиной  $xI + (1 - x)Q$  для разных значений  $x$ . Наиболее оптимальным является такое значение  $x$ , при

котором нанесенные на график точки ближе всего расположены к однозначной кривой. Постоянные  $C_0$ ,  $C_1$  и  $C_2$  являются функциями  $K$ ,  $x$  и расчетного периода времени  $\Delta t$ . Сумма этих постоянных равна единице;

- b) метод характерного участка, предложенный Калининым и Милюковым [12]:

$$Q_i = aI_{i-1} + (1 - a) Q_{i-1}, \quad (34.12)$$

где

$$a = I - e^{-\Delta t/K}, \quad (34.13)$$

а

$$K = \frac{S}{Q} \quad (34.14)$$

является постоянной величиной объема, равной времени дебегания на характерном участке. Индекс  $i$  обозначает порядковый номер интервала времени. Уравнение (34.12) применимо для транзитных участков характерной длины  $L$ , которая приближенно равна

$$L = \frac{Q}{Z \frac{\delta Q}{\delta h}}, \quad (34.15)$$

где  $Z$  — уклон водной поверхности; а  $\delta Q/\delta h$  — тангенс зависимости уровень-расход. Если отрезок реки состоит из нескольких характерных участков, расчет выполняется последовательно от верхнего характерного участка к нижнему. Вычисленный расход для нижнего створа первого участка принимается за начальный расход для второго участка и т. д.

Для длинных участков рек в случае отсутствия достаточного количества данных, необходимых для выделения ряда характерных участков, можно использовать формулу, выражющую трансформацию стока системой одинаковых линейных резервуаров:

$$Q(t) = I \frac{\Delta t}{K^n (N-1)!} t^{N-1} e^{-t/K}, \quad (34.16)$$

где  $N$  — число резервуаров. Параметры  $K$  и  $N$  определяются методом подбора. Применение компьютеров весьма удобно для этой цели, в том числе и для оперативных расчетов.

Существуют и другие гидрологические методы, например: метод кинематической волны, обобщенная линейная модель, а также метод диффузионной аналогии.

#### 34.4 Трансформация расходов воды водохранилищем

Водохранилище приводит к значительному уменьшению максимальных расходов по сравнению с естественным притоком. Рассчитать этот эффект можно путем использования традиционных графических методов, число которых значительно сократилось с тех пор, как появились компьютеры.

Прохождение паводка через водохранилище несколько отличается от его прохождения по речному руслу. Используются следующие уравнения сохранения массы и зависимости между уровнем и расходом:

$$I - Q = \frac{ds}{dt}, \quad (34.17)$$

$$\underbrace{Q}_{\text{водовыпуск}} = \underbrace{c_1 \cdot h^{1/2}}_{\text{водослив}} + \underbrace{c_2 \cdot h_t^{3/2}}, \quad (34.18)$$

где  $I$  — расход чистого притока в водохранилище (приток минус естественные потери и минус водозабор);  $s$  — емкость водохранилища;  $h$  — глубина воды в водохранилище;  $h_t$  — напор на гребне водослива;  $c_1$  и  $c_2$  — коэффициенты, зависящие от местных условий. Для решения уравнения необходимо установить зависимость между  $h$  и  $s$ . Решение осуществляется последовательно аналогично тому, как описано в разделе 34.3.

Сравнение гидрографа  $Q$  относительно гидрографа  $I$  показывает почти во всех случаях, что пик оттока  $Q$  меньше и запаздывает во времени по сравнению с пиком притока  $I$ . Это обстоятельство служит основной предпосылкой сооружения водохранилищ для защиты от паводков.

Поскольку скорость движения паводочной волны в водохранилище выше, чем в русле, то запаздывание пика оттока относительно пика притока совсем не означает, что такое же запаздывание имело бы место до сооружения водохранилища. Более того, сооружение водохранилища может иногда способствовать ухудшению условий прохождения паводка на нижнем участке независимо от влияния водохранилища на снижение пикового расхода. Ослабленный пик может совпасть по фазе с пиками притоков, что обычно наблюдалось до создания водохранилища. Таким образом, сооружение водохранилища не следует считать гарантией улучшения условий прохождения паводков на нижележащем участке. Необходимы тщательные гидрологические и гидравлические исследования для проектных условий.

### Список литературы

1. Калинин Г. П. и Милюков П. И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс. — Тр. ЦИП, 1958, вып. 66.
2. Fread, D. L., 1973: Technique for implicit dynamic routing in rivers with major tributaries. *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 4.
3. Preissman, A., 1961: *Propagation of Translatory Waves in Channels and Rivers*. Premier Congrès de l'Association française de calcul, Grenoble, France.

4. American Society of Civil Engineers, 1963: Friction factors in open channels. Proceedings of the American Society Civil Engineers, *Task Force Report*, Vol. 89, pp. 97-143.
5. Rouse, H., 1965: Critical analysis of open-channel resistance. *Journal of the Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 91, No. HY4, pp. 1-25.
6. Simons, D. B. and Senturk, F., 1977: *Sediment Transport Technology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
7. Limerinos, J. T., 1970: Determination of the manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1898-B*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
8. Hey, R. D., 1979: Flow resistance in gravel-bed rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. HY4, pp. 365-379.
9. Ven Te Chow, 1959: *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
10. Barnes, H. H., 1967: Roughness characteristics of natural channels. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
11. Cunge, J. A., Holly, E. and Verwey, A. 1980: *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Publishing Inc., Marshfield, Massachusetts.
12. McCarthy, G. T., 1938: *The Unit Hydrograph and Flood Routing*. Paper presented at the conference of the North Atlantic Division, U.S. Corps of Engineers, June (see also *Engineering Construction — Flood Control*, 1940, The Engineer School, Ft. Belvoir, Virginia., pp. 147-156).

## ГЛАВА 35

### АНАЛИЗ НИЗКОГО СТОКА И ЗАСУХ

#### 35.1       **Общие положения**

Прежде чем использовать реку в качестве надежного источника водоснабжения, необходимо провести анализ низкого стока. Если данные наблюдений показывают, что минимальный сток значительно превышает предполагаемое водопотребление, проводить дальнейший анализ нет необходимости. Однако, если однажды или дважды в течение рассматриваемого периода сток был ниже предполагаемого водопотребления, проведение дальнейшего анализа является совершенно необходимым, чтобы решить, насколько серьезен ожидаемый недостаток воды при низком стоке. Анализ повторяемости низкого стока и построение кривых обеспеченности являются двумя основными методами, используемыми при таком анализе. Если дефицит воды значителен и наблюдается довольно часто, необходимо обеспечить накопление воды во время высокой водности, чтобы использовать ее в периоды низкого стока. Хотя при проектировании необходимой для этой цели емкости требуется детальный анализ, на стадии предварительной оценки можно пользоваться кривыми проектной емкости, основанными на анализе повторяемости низкого стока.

В дополнение к анализу низкого стока при планировании водоснабжения на продолжительность и повторяемость бывают также случаи, при которых сток конкретного водотока может быть смоделирован во времени, как показано в разделе 44.6. Эта процедура сводится к экстраполяции гидрографа на период с незначительными осадками или с полным их отсутствием.

Длительные периоды низкого стока, во время которых не удовлетворяются потребности конкретных водопользователей, обычно называются засухами. В гидрологической литературе нет точного определения термина «засуха». Это происходит потому, что засухи можно определить по-разному в зависимости от цели исследования.

#### 35.2       **Кривые продолжительности стока**

Кривые продолжительности суточных расходов показывают количество суток (в процентах), в течение которых сток равен или превышает заданное значение. Однако они не дают информации о последовательности во времени этих расходов.

Кривая продолжительности обычно строится эмпирически посредством вычисления отношений числа дней, в которые расходы воды равны или превышают заданные значения, к общему числу дней в ряду. Для построения такой кривой отношения, которые являются оценками вероятности, наносятся на график относительно соответствующих расходов. Кривая продолжительности на графике будет иметь, как правило, вид прямой линии при нанесении на логарифмическую клетчатку вероятности, подобно той, что изображена на рисунке 35.1. Такой тип клетчатки вероятности обеспечивает одинаковую точность для любых расходов воды, что позволяет лучше видеть различия в характеристиках низкого стока.

Иногда для упрощения ранжирования данных кривые продолжительности строят по недельным или месячным расходам. В таких случаях образуемая кривая отражает процентное распределение недельных или месячных расходов, а не продолжительность суточных. Такие кривые, как правило, менее применимы, чем кривая продолжительности суточных расходов.

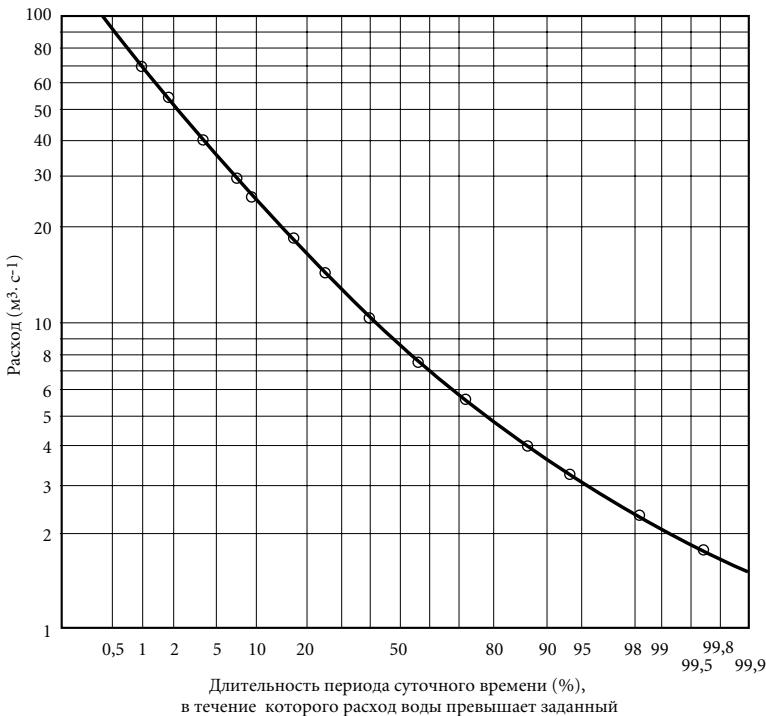


Рисунок 35.1 — Кривая продолжительности суточных расходов

В целях обеспечения оценки продолжительности стока для неизученных створов в пределах данного региона можно использовать региональные зависимости между кривыми продолжительности, полученными для изученных водосборов в районе с однородными гидрометеорологическими условиями, и их физико-географическими характеристиками.

Наибольшее применение кривые продолжительности находят при расчете гидроэнергетического потенциала при оценке как первичной, так и вторичной мощности.

### 35.3 Повторяемость низкого стока

Информацию о повторяемости низкого стока получают в результате анализа вероятностного распределения наблюденного минимального годового стока. При вычислении значений минимального годового стока за периоды заданной продолжительности, например за семь или тридцать дней, ряд наблюденных данных о стоке следует скомпоновать по климатическим годам, которые начинаются с сезона, когда вероятность высокого стока наибольшая, с тем чтобы не разрывать периоды низкого стока.

Для определения повторяемости низкого стока, т. е. значений  $Q_{Tr}$  для заданных периодов повторяемости применяются методы, аналогичные тем которые представлены в главе 27.

На рисунке 35.2 даны примеры кривых обеспеченности низкого стока. На клетчатку с логарифмическим масштабом по оси ординат наносятся данные о низком стоке, а по оси абсцисс — шкала вероятности превышения. Прямая линия на такой клетчатке соответствует распределению Вейбулла. Хотя есть очень мало случаев, когда на клетчатке получается прямая линия, использование этого типа клеточки позволяет спрямить нижние ветви кривых.

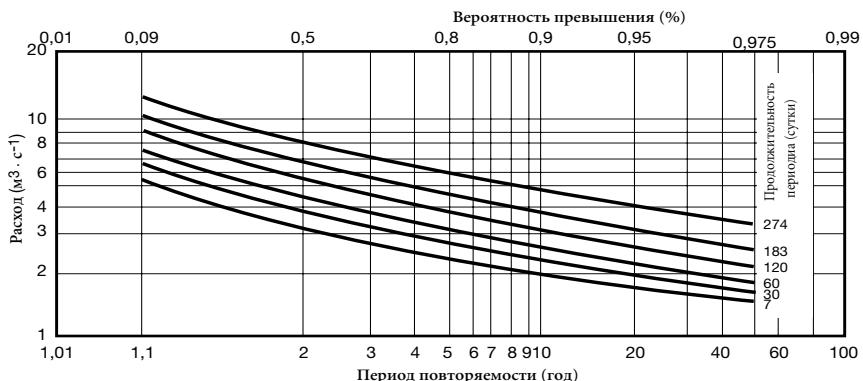


Рисунок 35.2 — Кривые обеспеченности годового низкого стока

Другим способом получения кривых обеспеченности низкого стока является применение трехпараметрических лог-нормальных распределений к наблюденным данным. В одном случае, коэффициент асимметрии логарифмов годового минимального стока используется для определения третьего параметра лог-нормального распределения, после чего для построения кривой используется таблица координат кривых обеспеченности. При таком подходе иногда используется коэффициент асимметрии, обобщенный по региону, вместо коэффициента асимметрии, полученного по выборке. При другом подходе используется преобразование  $y = \log(x - a)$ , где  $x$  символизирует ряды годового низкого стока. Принимается, что получаемая кривая обеспеченности значений  $y$  имеет нормальное распределение. Параметр  $a$  можно определить графически или рассчитать по выборке. Для расчета постоянной  $a$  и необходимого логарифмического стандартного отклонения используются: норма, стандартное отклонение и коэффициент асимметрии выборки с использованием теоретической зависимости между этими статистиками при лог-нормальном распределении.

Медианный недельный низкий годовой сток, полученный по кривым обеспеченности низкого стока, является хорошим показателем для расчета требуемой регулирующей емкости.

Другим распределением, которое может быть полезным при оценке минимального стока при определении возможности его использования, является гамма-распределение. Относительно простое двухпараметрическое гамма-распределение было описано Томом [1] и использовано на практике Александром [2]. Это распределение имеет нулевую нижнюю границу, что является преимуществом при анализе данных о речном стоке и осадках.

Кривые обеспеченности низкого стока для неизученных водосборов можно получить на основе зависимости между имеющимися кривыми обеспеченности низкого стока и характеристиками водосбора. Для оценки региональных кривых обеспеченностей низкого стока Кембелл [3] предложил индексный метод.

### 35.4 Статистический анализ гидрологических засух

Статистический анализ гидрологических засух (маловодья) является существенным элементом при оценке возможности использования водных ресурсов речного бассейна для целей водного хозяйства. Существуют несколько методов оценки засух для таких анализов. Один из них определяет период засухи с помощью следующих переменных:

- $Q_{min}$  — минимальный расход за период маловодья;
- $Q$  — средний расход за период маловодья;
- $V$  — дефицит воды, т. е. сумма разностей между  $Q_{HLW}$  — наивысшим расходом в период маловодья — и фактическими расходами;
- $T$  — продолжительность периода маловодья.

Для статистического анализа этих переменных необходимо использовать многофакторное вероятностное распределение [4]. Для упрощения расчетов проводится нормализация переменных  $Q_{min}$ ,  $Q$ ,  $V$  и  $T$ .

Еще одним методом, используемым для характеристики периода маловодья, является многофакторный статистический анализ переменных  $T_1$ ,  $T_2$ , ...,  $T_N$ , определяемых как максимальные непрерывные периоды в течение маловодья, когда расход остается соответственно ниже  $Q_1$ ,  $Q_2$ , ...,  $Q_N$ . В этом случае переменные также следует привести к нормальному распределению.

Описание анализа повторяемости объемов и продолжительности периодов низкого стока дано в работе Института гидрологии [5].

### 35.5      Аналisis кривых истощения

Низкий сток может быть сформирован за счет двух явлений: дренирования истощенных запасов грунтовых вод и стока в результате незначительных дождевых осадков, выпадающих в период межени. Если дренирующий водоносный горизонт ведет себя подобно линейному резервуару, первое явление в этом случае может быть описано зависимостью

$$Q(t) = Q_0 e^{-C(t-t(o))}, \quad (35.1)$$

где  $Q(t)$  — расход в момент времени  $t$ ;  $Q_0$  — расход в момент времени  $t(o)$ ; а  $C$  — коэффициент истощения. Для рек с ярко выраженным сезонами дождей (или снеготаяния) параметры  $Q_0$  и  $t(o)$  следует определять на конец сезона дождей. После определения  $Q_0$  легко определить параметр кривой истощения по наблюденным значениям расходов, нанесенным на логарифмическую клетчатку. Значение разностей между наблюденными расходами и определенными по кривой истощения можно скоррелировать с месячными суммами осадков во время засушливого периода. На этой основе можно вычислить меженные расходы воды для месячных или других периодов, спроектировав сезонные суммы осадков на основе исторических данных. Прогноз сезонного стока по данным о расходах воды за предшествующий период рассматривается в разделе 44.6.

Опыт показывает, что при определенных условиях истощение сезонного запаса воды может быть выражено следующим экспоненциальным уравнением [6]:

$$Q(t) = (Q_0 - Q_b)e^{-Ct} + Q_b, \quad (35.2)$$

где  $Q_b$  — базисный сток за счет притока глубоких подземных вод. Уравнение (35.2) показывает, что между средними расходами за последовательные периоды времени равной продолжительности  $T$  существует линейная зависимость

$$Q_2 = aQ_1 + (1 - a)Q_b, \quad (35.3)$$

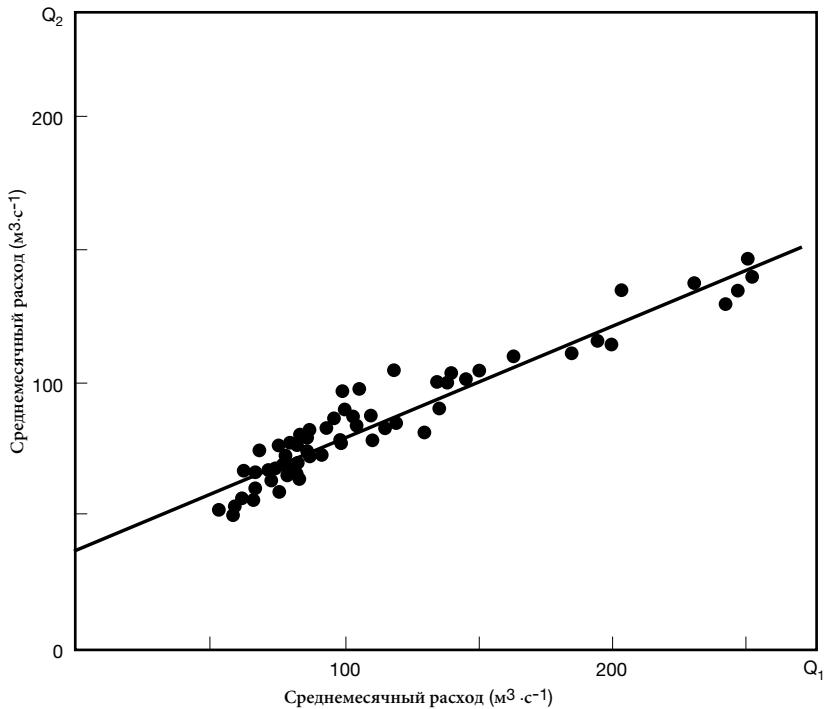


Рисунок 35.3 — Зависимость между средними расходами за предшествующий и последующий месяцы меженного периода

где  $Q_1$  и  $Q_2$  — средние расходы соответственно за два последовательных периода продолжительностью  $T$  дней;

$$a = e^{-CT}. \quad (35.4)$$

На рисунке 35.3 приведен пример такой зависимости.

В многих бассейнах минимальный сток меняется от года к году в широких пределах в зависимости от объема стока за предшествующий период высокой воды. В таких случаях для определения коэффициента истощения  $C$  можно использовать следующую эмпирическую зависимость:

$$Q_2 - Q_{min} = f(Q_1 - Q_{min}), \quad (35.5)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  — средние расходы соответственно за последовательные периоды; а  $Q_{min}$  — минимальный расход в рассматриваемом году.

Для построения эмпирических зависимостей (35.3) и (35.5) используются данные о средних декадных или среднемесячных расходах за ряд лет.

### Список литературы

1. Thom, H. C. S., 1958: A note on the gamma distribution. *Monthly Weather Review*, Vol. 86, April, pp. 117–122.
2. Alexander, G. N., 1962: The use of the gamma distribution in estimating regulated output from storage. *Civil Engineering Transactions*, Institution of Engineers, Australia, Vol. CE, No. 1, March, pp. 29–34.
3. Campbell, J. C., 1971: *Prediction of Seasonal Low Stream Flow Quantities*. Water Resources Research Institute, Corvallis, Oregon.
4. Zielinska, M., 1964: Methods of estimation and forecast of droughts in the probability approach. *Wiadomosci Sluzby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, No. 58, Warsaw.
5. Institute of Hydrology, 1980: *Low Flow Studies*. Research Report, Wallingford, Oxon.
6. Popov, E. G., 1964: Long-term river flow forecasting in the low-water period. *Symposium on Surface Waters*, 19–31 August 1963, Berkeley, California, IAHS Publication No. 63, pp. 63–67.



## ГЛАВА 36

### ПОВТОРЯЕМОСТЬ ПАВОДКА

#### 36.1        **Анализ данных наблюдений**

##### 36.1.1      **Максимальный сток**

[I81]

Методика расчета повторяемости паводков в основном аналогична той, которая изложена в главе 27. Цель анализа — установить связь между величиной паводка и его повторяемостью или вероятностью наступления в будущем. Ключевыми предпосылками, которые позволяют интерпретировать повторяемость как вероятностное явление, являются независимость элементов анализируемой выборки во времени и однородность выборки. Использование неполных рядов при исследовании паводков — более проблематично, чем при исследовании дождевых осадков, поскольку максимальные расходы разных паводков в течение года могут быть более зависимы по сравнению с вызвавшими их осадками. Однако, если при выборе значений, превышающих заданный порог, соблюдается осторожность, то анализ неполных рядов может оказаться вполне успешным. Поскольку это трудно гарантировать, гораздо чаще для исследования рядов годовых максимумов (рядов максимального годового стока) применяется анализ повторяемости [1, 2].

Ряды максимального годового стока могут состоять либо из суточных максимумов, либо из мгновенных паводочных расходов. Важно определить, какие именно данные требуются для анализа. Взаимосвязь этих двух рядов в одном пункте зависит от физических характеристик водосбора, а также от климатических факторов, вызывающих формирование максимумов в обоих случаях. На малых водосборах обычно оба максимума не могут иметь место в один и тот же день и не могут явиться результатом одинаковых климатических процессов, происходящих на водосборе.

Другим важным обстоятельством при расчете повторяемости паводков является учет тесноты связи между уровнями и расходами воды. При изменении зависимости между уровнем и расходом многие данные об уровнях могут представать как неоднородные и непригодные для анализа повторяемости. В определенных случаях целесообразнее работать с расходами, и, при необходимости, увязывать результаты анализа повторяемости уровней с самыми последними зависимостями между уровнями и расходами. В некоторых случаях, например при образовании высоких уровней за счет затора, целесообразнее работать только с уровнями при определении зон затопления.

Часто, кроме наблюдений за сравнительно короткий период, может быть использована дополнительная историческая информация, имеющая отношение к величине паводков и полученная до начала систематического сбора данных. Например, какая-либо станция имеет до 1992 года всего 20-летний период наблюдений, однако известно, что в 1900 году был паводок с расходом  $1\,000 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , который превысил все когда-либо наблюденные здесь паводки и который оказался максимальным с того времени, как здесь в 1860 году было организовано поселение. Величину этого паводка и информацию о том, что в период с 1860 по 1992 гг. все паводки были ниже того, который имел место в 1900 году, можно и нужно использовать при анализе повторяемости. С другой стороны, может быть известно, что определенное число паводков с 1860 по 1972 год превысили некоторый порог. Эта историческая информация также должна быть использована при анализе повторяемости. Два наиболее широко распространенных метода используют определенные виды исторической информации при оценке параметров функции распределения. Это — методы исторически взвешенных моментов [3] и максимального правдоподобия с теорией проверки [4–7]. Показано, что метод максимального правдоподобия делает более эффективным применение дополнительной информации по сравнению с методом исторически взвешенных моментов [7]. Может быть проведена оценка периода повторяемости исторического паводка при его известной величине, и он может быть нанесен на график, наряду с систематически наблюдаемыми паводками, с целью получения совокупной кривой обеспеченности [1, 3, 4].

### 36.1.2 Статистический анализ гидрографов паводков

В ряде случаев, например при проектировании водохранилища, необходимо установить повторяемость объемов паводка и максимальных расходов. В этом случае можно использовать многомерный статистический анализ гидрографов паводков. Гидрограф паводка можно определить, используя следующие случайные переменные:

$Q_{max}$  — максимальный расход за паводок;  
 $V$  — объем паводочной волны ( $\text{м}^3$ );  
 $T$  — продолжительность паводка.

Пользуясь другой системой переменных, гидрограф паводка можно определить с помощью последовательности расходов  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  за соответствующие последовательные равные интервалы времени в течение паводка. Статистический анализ случайных переменных ( $Q_{max}, V, T$ ) или ( $Q_1, \dots, Q_n$ ) можно выполнить с помощью многомерного вероятностного распределения. Некоторые определения и расчетные методы, связанные с такими вероятностными моделями, можно найти в работах Качмарека [8] и Стаммерса [9]. Применительно к характеристикам паводка можно использовать метод трансформации или другие методы, чтобы нормализовать данные. Альтернативно повторяемость или

вероятность наступления или ненаступления паводка определенного объема в течение периода в  $n$ -дней можно непосредственно оценить методом анализа повторяемости на основании данных о стоке в пункте наблюдений или путем использования методов районирования (раздел 36.2).

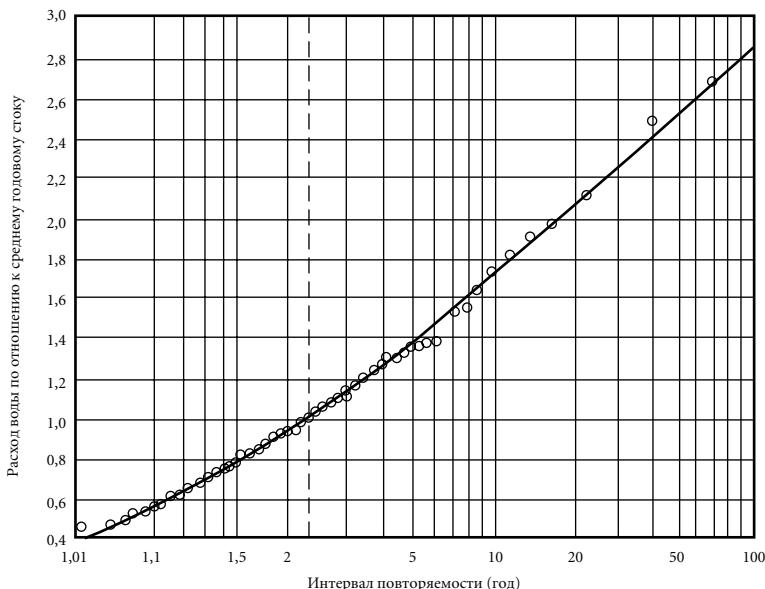
### 36.2 Обобщение характеристик паводков по району

[K10]

Для пункта, по которому нет большого количества наблюдений в виде рядов максимальных годовых расходов, в целях оценки квантилей характеристик паводков рекомендуется использовать региональный анализ их повторяемости. Как правило, довольно широко используются два метода районирования. Один из них — метод индекса паводков, другой основан на использовании регрессионных подходов.

#### 36.2.1 Метод индекса паводков

Метод индекса паводков, в представлении Далримпля [10, 11], предусматривает два основных этапа. Первый этап — построение безразмерной кривой обеспеченности для однородного района. Кривую получают в результате анализа повторяемости по каждой станции в отдельности. Кривая по каждой станции строится безразмерной путем деления ординат кривой на индекс, например индекс паводка,



Региональная безразмерная кривая повторяемости паводков

соответствующего периоду повторяемости в 2 года или в 2,33 года. Медианные безразмерные значения выбираются для разных периодов повторяемости по данным всех пунктов. Затем они наносятся на клетчатку вероятностей, как показано ниже на рисунке. На втором этапе строится зависимость между индексом и физическими и климатическими характеристиками водосбора. Можно использовать также подходы, основанные на регрессионном анализе (раздел 36.2.2). Комбинация метода индекса с безразмерной кривой позволяет получить кривую обеспеченности для любого водосбора в пределах данного региона. Метод индекса предполагает, что все паводки в пределах данного района соответствуют распределению 1-го типа (двойному экспоненциальному или Гумбеля) и что этот район географически однороден. Был разработан тест на однородность, чтобы определить, есть ли различия в наклоне кривых обеспеченностей, полученных по данным всех станций данного района, по сравнению с кривыми для отдельно взятых случайных станций. Подобные тесты используются для трехпараметрического логарифмически нормального распределения [12] и для распределения Вейбулла [13].

Большая работа была проделана по развитию исходных концепций и повышению точности метода индексов для определения различных квантилей паводков [14–17]. Достижению успехов в этой области способствовала разработка вероятностного метода взвешенных моментов [18] и L-моментных статистик [19]. Необходимость аналитических тестов на однородность может быть опровергнута методами Монте-Карло. Однородность должна и может характеризоваться по наклону кривой, которая, по Дастримплю, определяется коэффициентом вариации, включая также оценки асимметрии и эксцесса для рассматриваемого района. Это ведет к более гибкому применению индекса и позволяет применить более высокие моменты с использованием всех данных по району, чтобы получить наиболее достоверное распределение. Неоднородность более низких моментов можно оценить и потенциально связать с характеристиками водосбора. Хоскинг и Уоллис [16] показывают, что: «даже тогда, когда присутствует однородность и взаимозависимость в данных по станциям, а форма (регионального) распределения вероятности паводков определена недостаточно надежно, предпочтение следует отдавать региональному анализу повторяемости паводков, а не анализу точечных данных».

### 36.2.2 *Методика, основанная на регрессии*

Для оценки величины паводочного расхода, который будет иметь место в среднем один раз в  $T_r$  лет и обозначенного  $Q_{TR}$ , можно воспользоваться регрессионными методами с использованием физических и климатических характеристик водосбора [20–23]. Величина паводка при разных периодах повторяемости для каждой станции оценивается на основании анализа повторяемости этих событий с использованием предварительно выбранного распределения. В свою очередь, указанные выше характеристики по каждому водосбору определяются по

топографическим картам или на основании обобщенных климатологических данных (глава 40). Параметры уравнений, связывающих  $Q_{TR}$  с характеристиками водосбора, можно получить с помощью обычного метода наименьших квадратов [20–23], взвешенных наименьших квадратов [24] или обобщенных наименьших квадратов [25]. Последние два подхода используются в целях устранения недостатков, имеющих место при использовании обычного метода наименьших квадратов. Последний не учитывает различных погрешностей определения характеристик паводков, которые обусловлены разной продолжительностью рядов наблюдений по отдельным станциям. Таскер [24] предложил использовать метод взвешенных наименьших квадратов с дисперсией погрешностей определения наблюденных характеристик паводка, рассчитанной как обратная функция длины ряда. Метод обобщенных наименьших квадратов был предложен, поскольку он позволяет учесть как неодинаковую надежность, так и неодинаковую корреляцию между характеристиками паводков, полученных по отдельным пунктам. Используя метод Монте-Карло, Штедингер и Таскер [25] показали, что метод обобщенных наименьших квадратов обеспечивает более точные оценки коэффициентов регрессии, их большую надежность и лучшие оценки погрешностей модели:

$$Q_{TR} = aA^bZ^cS^dP^eD^fM^g, \quad (36.1)$$

где  $Q_{TR}$  — максимальный годовой расход повторяемостью  $T$ -лет;  $A$  — площадь водосбора;  $Z$  — уклон основного русла;  $S$  — относительная площадь поверхностного задержания, %, плюс 0,5 %;  $P$  — интенсивность ливня повторяемостью  $T$ -лет;  $D$  — среднее значение январской отрицательной температуры воздуха;  $M$  — орографический фактор;  $a, b, c, d, e, f$  и  $g$  — коэффициенты регрессии. При получении уравнения (36.1) были опробованы многие независимые переменные и способы их определения. Это делалось для того, чтобы получить независимые друг от друга переменные, которые физически связаны с зависимой переменной. Независимые переменные, которые связаны с паводком редкой повторяемости, не могут обуславливать паводки частой повторяемости. Логарифмическое преобразование уравнения (36.1) можно использовать для создания линейной аддитивной модели применительно к методу регрессии. Другие типы преобразований так же можно применить к зависимым и независимым переменным, однако наиболее распространенным остается логарифмическое преобразование. Знаки и величины коэффициентов модели должны иметь гидрологический смысл. Например, показатель степени  $d$  члена уравнения, характеризующего поверхностное задержание, должен иметь отрицательный знак, потому что влияние такого задержания (при наличии озера, водохранилища и т. д.) заключается в распластывании пиков паводка. Другие показатели степени должны быть положительными, причем их величины изменяются в зависимости от периода повторяемости. Следует иметь в

виду, что в модель не следует вводить слишком большое число независимых переменных. Переменные, включенные в регрессионную модель, должны быть статистически значимыми на некотором заданном и общепринятом уровне значимости [26].

Получаемое в результате уравнение регрессии должно быть оценено на его региональную однородность. Остаточные ошибки регрессии следует нанести на топографические карты, чтобы визуально проверить очевидность их смещенности с учетом географических особенностей местности. Если при оценке максимального годового расхода за  $T$  лет такая смещенность очевидна, то для проверки ее значимости можно использовать тест Уилкоксона. Этот тест обеспечивает объективную проверку гипотезы, что медиана остатков в субрегионе соответствует медиане остаточных ошибок основного региона, для которого и было получено уравнение регрессии [27]. Для разных периодов повторяемости можно выбрать разные однородные регионы. Однородный регион, принятый для получения зависимости, связывающей индекс паводка с характеристиками водосбора, не обязательно должен совпадать с однородным регионом, по которому принимается характерное распределение при использовании метода индекса, подобное наклону безразмерной кривой.

### Список литературы

1. Kite, G. W., 1988: *Frequency and Risk Analysis in Hydrology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
2. World Meteorological Organization, 1989: *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis* (C. Cunnane). Operational Hydrology Report, 33, WMO-No. 718, Geneva.
3. Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982: *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Bulletin 17B of the Hydrology Subcommittee, U.S. Geological Survey, Office of Water Data Coordination, Reston, Virginia.
4. Pilon, P. J., Condé, R. and Harvey, K. D., 1985: *The Consolidated Frequency Analysis (CFA) Package*. (HOMS component I.81.2.02), Environment Canada, Water Resources Branch, Ottawa, pp. 163.
5. Leese, M. N., 1973: Use of censored data in the estimation of Gumbel distribution parameters for annual maximum flood series. *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 6, pp. 1534–1542.
6. Condé, R., 1986: Flood samples from a three-parameter lognormal population with historic information: the asymptotic standard error of estimate of the T-year flood. *Journal of Hydrology*, Vol. 85, pp. 139–150.
7. Stedinger, J. R. and Cohn, T. A., 1986: Flood frequency analysis with historical and paleoflood information. *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 785–793.

8. Kaczmarek Z., 1961: Forecasting of random variable systems. *Wiadomosci Sluzby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, No. 42, Warsaw.
9. Stammers, W. N., 1967: The application of multivariate techniques in hydrology. *Proceedings of the Hydrology Symposium No. 5*, McGill University, Montreal.
10. Dalrymple, T., 1949: *Regional Flood Frequency Analysis*. Presentation to the twenty-ninth annual meeting of the highway research board, Washington, D.C., pp. 22.
11. Dalrymple, T., 1960: Flood frequency analysis. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1543-A*, Reston, Virginia, pp. 80.
12. Harvey, K. D., Condie, R. and Pilon, P. J., 1985: Regional flood frequency analysis with the three-parameter lognormal distribution. *Proceedings of the Seventh Canadian Hydrotechnical Conference*, Canadian Society for Civil Engineers, Saskatoon, Saskatchewan, pp. 14.
13. Pilon, P. J., 1990: The Weibull distribution applied to regional low flow frequency analysis. *Proceedings of the Symposium on Regionalization in Hydrology*, 23–26 April 1990, Ljubljana, Yugoslavia, IASH Publication No. 191, pp. 101–111.
14. Lettenmaier, D. P. and Potter, K. W., 1985: Testing flood frequency estimation methods using a regional flood generation model. *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1903–1914.
15. Lettenmaier, D. P., Wallis, J. R. and Wood, E. F., 1987: Effect of regional heterogeneity on flood frequency estimation. *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 313–323.
16. Hosking, J. R. M. and Wallis, J. R., 1988: The effect of intersite dependence on regional flood frequency analysis. *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 588–600.
17. Gabriele, S. and Arnell, N., 1991: A hierarchical approach to regional flood frequency analysis. *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 6, pp. 1281–1289.
18. Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C. and Wallis, J. R., 1979: Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1049–1054.
19. Hosking, J. R. M., 1990: L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 52, pp. 105–124.
20. Benson, M. A., 1962: Evolution of methods for evaluating the occurrence of floods. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1580-A*, Reston, Virginia, pp. 30.
21. Benson, M. A., 1962: Factors influencing the occurrence of floods in a humid region of diverse terrain. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1580-B*, Reston, Virginia, pp. 62.
22. Benson, M. A., 1964: Factors affecting the occurrence of floods in the southwest. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1580-D*, Reston, Virginia, pp. 72.

23. Thomas, D. M. and Benson, M. A., 1970: Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1975*, Reston, Virginia, pp. 55.
24. Tasker, G. D., 1980: Hydrologic regression with weighted least squares. *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 1107–1113.
25. Stedinger, J. R. and Tasker, G. D., 1985: Regional hydrologic analysis — ordinary, weighted and generalized least squares compared. *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 9, pp. 1421-1432.
26. Draper, N. R. and Smith, H., 1981: *Applied Regression Analysis*. Second edition, John Wiley & Sons, Inc., Toronto.
27. Tasker, G. D., 1982: Simplified testing of hydrologic regression regions. *Journal of the Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 108, No. HY10, pp. 1218–1222.

## ГЛАВА 37

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ С ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ

#### 37.1        **Общие положения**

Испарение с озер или водохранилищ нельзя прямо измерить, подобно стоку или дождевым осадкам [5]. Его необходимо определять с помощью одного или нескольких методов, изложенных в последующих разделах. Эти методы включают: метод водного баланса, метод теплового баланса, аэродинамический метод и методы измерений с помощью испарителя [2–4].

#### 37.2        **Метод водного баланса**

Теоретически метод водного баланса очень прост. Испарение определяется по разнице между измеренными величинами притока, оттока и изменения влагозапасов. К сожалению, этот метод не находит широкого практического применения для определения испарения с озера или водохранилища, так как погрешности измерения притока, оттока и запаса воды часто бывают слишком велики по сравнению с величиной испарения. Фильтрация, гидрометрически неизученный местный приток и береговое регулирование являются трудноучитываемыми составляющими, которые часто невозможно измерить. Однако при определенных условиях этот балансовый метод дает отличные результаты и служит основой для оценки точности метода теплового баланса и аэродинамического метода (разделы 37.3 и 37.4) при изучении испарения с озер и водохранилищ.

Водный баланс озера или водохранилища включает следующие элементы: испарение —  $E$ ; приток —  $I$ ; осадки —  $P$ ; полную фильтрацию и береговое регулирование —  $V_{ss}$ ; отток —  $O$ ; и изменение запаса воды —  $\Delta S$ . Если все эти элементы могут быть измерены или рассчитаны, тогда можно записать следующее:

$$E = I + P - V_{ss} - O \pm \Delta S. \quad (37.1)$$

Данное уравнение записано в единицах объема. Для того чтобы получить слой испарения, необходимо разделить объем испарившейся воды на площадь открытой водной поверхности. Период времени должен быть достаточно продолжительным, чтобы испарение  $E$  было достаточно велико по сравнению с погрешностями определения других членов уравнения.

Этот метод применим для оценки испарения только там, где фильтрация, приток и отток незначительны по сравнению с испарением.

### 37.2.1 *Приток и отток*

Поступление воды в водохранилище и отток из него должны происходить по хорошо выраженным руслам. Приток и отток должны непрерывно измеряться методами, изложенными в главах 10 и 11. По возможности, на гидрометрических створах следует устанавливать водосливы, чтобы обеспечивать постоянную и надежную зависимость между уровнями и расходами воды и тем самым повысить точность измерений.

### 37.2.2 *Осадки*

Объем осадков, выпавших на поверхность озера, должен надежно определяться по данным осадкомеров, которые обычно расположены на берегу. Однако, если озеро большое, несколько осадкомеров должны быть установлены также в пределах самого озера. Для этих целей можно использовать простые осадкомеры, а не самописцы (раздел 7.3), потому что элементы водного баланса рассчитываются по недельным или более длительным интервалам времени. Число таких осадкомеров будет зависеть от изменчивости осадков и размеров озера.

### 37.2.3 *Фильтрация и береговое регулирование*

Эти элементы не могут быть прямо измерены, и должны определяться косвенными методами. Один из методов определения фильтрации описан в разделе 37.4.1. Береговое регулирование можно оценить по данным измерения уровня грунтовых вод в скважинах вокруг озера. Только определив, что фильтрация и береговое регулирование сравнительно невелики, выбирают озеро или водохранилище для измерений испарения этим методом.

### 37.2.4 *Изменение запаса воды в водохранилище*

Изменение уровня воды в водохранилище достаточно точно определяется с помощью самописцев уровня воды (как описано в главе 10). Зависимость между уровнем и запасом воды должна быть точно установлена путем наблюдений.

## 37.3 *Метод теплового баланса*

Метод теплового баланса применяется для оценки испарения с поверхности океанов, озер и водохранилищ, а также для оценки суммарного испарения с суши (глава 38). Этот метод основан на учете всех источников поступления и оттока тепловой энергии и изменений запаса тепла, разность между которыми определяет тепловую энергию, расходуемую на испарение.

Оценка испарения с поверхности озер или водохранилищ с помощью этого метода требует точечных наблюдений за: приходящей солнечной и длинноволновой радиацией, температурой воздуха и поверхности воды, давлением водяного пара в атмосфере, запасом тепловой энергии в водной массе и поступлением и выносом тепла с притоком и оттоком. Необходимые для этого приборы и методы наблюдений описаны в разделе 9.5.

Метод теплового баланса трудно применять на практике из-за сложности необходимых полевых измерений. Однако в настоящее время он обеспечивает лучшие результаты для широкого диапазона условий по сравнению с любым другим методом.

Основное уравнение теплового баланса озера или водохранилища можно представить в следующем виде:

$$Q_x = R_s - R_{sr} + R_a - R_{ar} - R_{bs} - Q_E - Q_h + Q_v - Q_w + Q_b \quad (37.2)$$

где  $Q_x$  — изменение запаса тепла в водной массе;  $R_s$  — солнечная радиация, поступившая на водную поверхность;  $R_{sr}$  — отраженная солнечная радиация;  $R_a$  — длинноволновая радиация, поступившая из атмосферы;  $R_{ar}$  — отраженная длинноволновая радиация;  $R_{bs}$  — длинноволновая радиация, излучаемая водоемом;  $Q_E$  — тепло, затраченное на испарение;  $Q_h$  — тепло, теряемое водной массой посредством турбулентного обмена;  $Q_v$  — теплообмен с водной массой за счет притока или оттока;  $Q_w$  — тепло, теряемое вместе с испарившейся водой;  $Q_b$  — теплообмен между водной массой и дном водоема. Такими составляющими, как нагревание за счет химических и биологических процессов и переход кинетической энергии в тепловую, можно пренебречь ввиду их незначительности.

Во время полного или частичного ледостава оценка теплового баланса не считается надежной из-за трудности измерения отраженной солнечной радиации, температуры поверхности льда и площади, покрытой ледяным покровом.

Вопрос об определении теплового баланса водохранилища за сутки практически не рассматривается из-за трудности оценки изменений запасов тепла за такой короткий промежуток времени. По этой причине расчеты рекомендуется делать за 10-дневные и более продолжительные периоды.

Каждый член уравнения теплового баланса либо измеряется непосредственно, либо рассчитывается на основании известных соотношений. Способы оценки каждого члена уравнения описаны ниже в соответствующих разделах.

Следующие члены в уравнении (37.2) могут быть измерены:  $R_s$ ,  $R_{sr}$ ,  $R_a$ , а уравнение радиационного баланса может быть представлено в следующем виде:

$$R_f = R_s - R_{sr} + R_a - R_{ar} - R_{bs}. \quad (37.3)$$

Все элементы выражены в  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ . Детальное описание приборов и методов измерений вышеуказанных составляющих можно найти в публикации ВМО *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений* [1].

Способы, используемые для оценки других составляющих уравнения (37.2), описываются в следующих разделах.

### 37.3.1 *Отраженная длинноволновая радиация*

Отраженную длинноволновую радиацию можно принимать равной 3 % от длинноволновой радиации, поступившей к водной поверхности.

### 37.3.2 Радиация, излучаемая поверхностью водохранилища

Радиация, излучаемая поверхностью водохранилища, рассчитывается согласно закону Стефана—Больцмана, выведенного для абсолютно черного тела. Коэффициент излучения для воды составляет 0,970. Уравнение для расчета радиации, излучаемой водной поверхностью, имеет вид

$$R_{bs} = 0,97\sigma\theta^4, \quad (37.4)$$

где  $R_{bs}$  — радиация, излучаемая водной поверхностью,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ;  $s$  — постоянная Стефана—Больцмана ( $5,67 \times 10^{-8} \cdot \text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{°К}^{-4}$ );  $\theta$  — температура поверхности воды,  $^{\circ}\text{К}$ . Средняя температура поверхности воды определяется для каждого периода по данным самописцев, установленных вблизи центра водохранилища. Температура переводится в  $^{\circ}\text{К}$ , а средняя величина радиации, излучаемой водной поверхностью, рассчитывается за исследуемый период в  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ .

### 37.3.3 Изменение запаса тепла

Запас тепла в водохранилище за данный срок рассчитывается по температуре воды, измеренной для этого же срока. Такие измерения температуры, точность которых должна быть в пределах  $0,1 \ ^{\circ}\text{C}$ , проводятся в основном с двухнедельным или месячным интервалом. Водная масса водохранилища может быть разделена на несколько слоев от поверхности до дна. Объем воды в каждом из этих слоев определяется по зависимости уровень—объем. Наблюдения за температурой в каждом отдельном слое усредняются, чтобы получить среднюю температуру всего объема воды. Сумма произведений объемов воды на среднюю температуру (за основу принимается температура  $0 \ ^{\circ}\text{C}$ ) дает запас тепла на определенную дату. Плотность и удельная теплоемкость воды для всего диапазона температур, которые наблюдаются в водохранилище, принимаются равными единице.

Чтобы определить теплоту, расходуемую на испарение  $Q_E$ , необходимо оценить изменения запаса тепла, происходящие за счет адвекции тепла водой, поступающей в водохранилище или вытекающей из него. При расчете количества тепла в этих потоках в качестве исходной принимается температура  $0 \ ^{\circ}\text{C}$ . В зависимости от изменчивости температуры при изменении расходов воды температура воды этих потоков определяется по данным непосредственных наблюдений или по самописцам (раздел 9.5.5). Если температура воды изменяется с изменением расходов воды, то ее среднее значение должно определяться как среднее взвешенное относительно расхода воды. Температура воды, пошедшей на фильтрацию в берега и просачивание, принимается равной среднегодовой температуре воздуха. Такое допущение может привести к ошибкам, но не существенным, если доля поверхностного притока в водном балансе является существенной.

Если осадки составляют существенную часть водного баланса, то тепло, содержащееся в выпавших осадках, необходимо учитывать. За температуру осадков принимается температура воздуха по смоченному термометру во время их выпадения.

При расчете запаса тепла в каждом из указанных объемов воды используются единицы сантиметр—грамм—секунда; плотность и удельная теплоемкость принимаются равными единице для всего диапазона температур этих объемов. Умножением температуры на объем воды получают количество тепла в каждом объеме в джоулях.

Разность между рассчитанными значениями количества тепла в воде по результатам термических съемок в начале и в конце изучаемого периода покажет изменение запасов тепла в водоеме.

### 37.3.4 *Тепло, затрачиваемое на испарение*

Тепло  $Q_E$ , затрачиваемое на испарение, может быть определено по уравнению

$$Q_E = \rho_w E L_v, \quad (37.5)$$

где  $E$  — интенсивность испарения,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\rho_w = 1\ 000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ; и  $L_v = 2,47 \times 10^6 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$ .

### 37.3.5 *Тепло, поступающее к водной массе или теряющееся ею посредством турбулентного обмена*

Поскольку количество тепла, поступающего к водной массе или теряющееся ею посредством турбулентного обмена  $Q_h$ , измерить невозможно, оно определяется косвенно по отношению Боуэна  $B$ , имеющего вид

$$B = Q_h/Q_E. \quad (37.6)$$

Отношение Боуэна можно выразить также следующей формулой:

$$B = \frac{0,61(\theta_o - \theta_a)}{(e_o - e_a)} \frac{p}{1000}, \quad (37.7)$$

где  $\theta_o$  — температура поверхности воды,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta_a$  — температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  $e_o$  — максимальная упругость водяного пара, гПа, определяемая по температуре поверхности воды;  $e_a$  — упругость водяного пара над водной поверхностью, гПа;  $p$  — атмосферное давление, гПа.

Чтобы рассчитать отношение Боуэна для расчетного периода, члены уравнения  $\theta_o$ ,  $\theta_a$  и  $e_a$  усредняются за этот период. Значение  $e_o$  определяется по средней температуре поверхности воды за этот период. Величина  $p$  определяется по данным о высоте положения озера над уровнем моря и обычно принимается постоянной. Отношение Боуэна является безразмерным.

### 37.3.6 *Тепло, теряемое с испаряющейся водой*

Тепло, теряемое с испарившейся водой, можно рассчитать с помощью следующего уравнения:

$$Q_w = \rho_w c_w E (\theta_e - \theta_b), \quad (37.8)$$

где  $c_w$  — удельная теплоемкость воды ( $4\,200 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\theta_e$  — температура испарившейся воды, принимаемая равной температуре поверхности воды в  $^{\circ}\text{C}$ ; и  $\theta_b$  — исходная температура ( $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### 37.3.7 *Теплообмен между водной массой и дном водохранилища*

Этот элемент теплового баланса может быть существенным в периоды, когда другие элементы баланса имеют низкие значения, что обычно имеет место весной и осенью в особенности в мелких водоемах. Приближенные значения  $Q_b$  можно найти в таблице 37.1.

### 37.3.8 *Испарение*

Для расчетов испарения используются следующие зависимости:

$$Q_E = \rho_w El_v; Q_h = B Q_E \text{ и } Q_w = \rho_w c_w E (\theta_e - \theta_b), \quad (37.9)$$

где  $E$  — интенсивность испарения,  $\text{см}\cdot\text{сут}^{-1}$ ;  $\rho_w$  — плотность воды,  $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ ;  $l_v$  — скрытая теплота испарения,  $\text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}$ ;  $B$  — отношение Боуэна;  $c_w$  — удельная теплоемкость воды,  $\text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\theta_e$  — температура испарившейся воды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta_b$  — исходная температура, равная  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Подставляя приведенные выше зависимости в основное уравнение теплового баланса и решая его относительно  $E$ , получаем

$$E = \frac{R_s - R_{sr} + R_a - R_{bs} - Q_x + Q_v + Q_b}{\rho_w l_v (1 + B) + c_w (\theta_e - \theta_b)}, \quad (37.10)$$

где  $E$  выражается в  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Точность оценки испарения по уравнению теплового баланса будет зависеть от точности измерительного оборудования и полноты данных наблюдений. Если все члены уравнения определены с точностью, указанной в разделе 9.5, при минимальном недостатке данных наблюдений, точность получаемых результатов будет находиться в пределах средних ошибок от 10 % летом до 20 % зимой.

## 37.4 Аэродинамические подходы

Аэродинамические подходы основаны на теоретическом положении о том, что перенос водяного пара с поверхности воды в атмосферу является турбулентным процессом, связанным с определенными метеорологическими явлениями. Для выражения этой связи были получены многочисленные аэродинамические

Таблица 37.1  
Приближенные значения  $Q_b$ (Вт·м<sup>-2</sup>)\*

Северная широта	Средняя глубина водоема (м)				Северная широта	Средняя глубина водоема (м)				
	0–5		10 15 20			0–5		10 15 20		
	10	15	15	20		10	15	15	20	
<b>Январь</b>										
30	13	12	9	8	30	-11	- 9	- 8	- 7	
40	11	9	8	8	40	-11	- 9	- 8	- 7	
50	7	6	6	5	50	-12	-11	- 9	- 8	
60	5	5	3	3	60	-12	-12	-11	- 8	
70	3	3	2	2	70	-12	-12	-11	- 8	
<b>Февраль</b>										
30	8	8	6	5	30	- 5	- 5	- 3	- 3	
40	6	6	5	3	40	- 5	- 5	- 3	- 3	
50	5	3	3	2	50	- 5	- 3	- 3	- 2	
60	3	2	2	2	60	- 3	- 3	- 2	- 2	
70	2	2	2	1	70	- 3	- 3	- 2	- 2	
<b>Март</b>										
30	- 3	- 3	- 2	- 2	30	2	2	2	1	
40	1	1	1	0	40	3	2	2	2	
50	3	3	2	2	50	5	3	3	2	
60	2	2	2	2	60	5	5	5	3	
					70	6	6	5	5	
<b>Апрель</b>										
30	-19	-17	-15	-13	30	14	13	12	9	
40	-14	-13	-12	- 9	40	14	12	11	8	
50	- 8	- 6	- 6	- 5	50	12	11	9	8	
60	0	0	0	0	60	12	9	8	7	
					70	11	9	8	7	
<b>Май</b>										
30	-16	-14	-13	-11	30	16	14	13	11	
40	-16	-14	-13	-11	40	15	13	13	11	
50	-15	-14	-12	-11	50	13	12	11	8	
60	-14	-13	-12	- 9	60	12	11	9	8	
70	- 9	- 9	- 8	- 6	70	9	9	8	6	
<b>Июнь</b>										
30	-15	-14	-12	-11	30	17	15	14	12	
40	-16	-14	-13	-11	40	14	12	11	9	
50	-16	-14	-13	-12	50	11	9	8	7	
60	-16	-14	-13	-12	60	7	6	6	5	
70	-17	-15	-13	-12	70	5	3	3	2	
<b>Декабрь</b>										

\*Если средняя глубина превышает 50 м,  $Q_b = 0$ .

уравнения как теоретические, так и эмпирические. Некоторые из этих уравнений являются сложными математическими выражениями и требуют большого объема метеорологических наблюдений, другие, более простые, требуют лишь измерений скорости ветра и упругости водяного пара. Известен также метод вихревой (турбулентной) диффузии (вихревого (турбулентного) обмена или вихревого (турбулентного) перемешивания), который основан на использовании измерений вертикального переноса в атмосфере.

Многие аэродинамические уравнения для расчета испарения были проверены во время исследований на озере Хефнер (США), а также на крупных водохранилищах: Рыбинском, Куйбышевском и Цимлянском (СНГ). Для примера приводятся два простых уравнения, которые дали хорошие результаты. Для их применения требуются только измерения скорости ветра, температуры воды и упругости водяного пара. Приборы и методы наблюдений для получения этих данных описаны в разделе 9.5.

Первое уравнение, полученное по результатам исследований на озере Хефнер [6], имеет вид

$$E = N u (e_o - e_a), \quad (37.11)$$

где  $E$  — испарение,  $\text{см} \cdot \text{сут}^{-1}$ ;  $N$  — коэффициент;  $u$  — скорость ветра над водной поверхностью,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $e_o$  — упругость насыщенного водяного пара,  $\text{гПа}$ , соответствующая температуре водной поверхности;  $e_a$  — упругость водяного пара в воздухе,  $\text{гПа}$ .

Второе уравнение [7], проверенное в процессе исследований на упомянутых выше трех водохранилищах Содружества Независимых Государств, имеет вид

$$E_o = 0,14 (1 + 0,72u_{200}) n(e_o - e_{200}), \quad (37.12)$$

где  $E_o$  — испарение с водоема,  $\text{мм} \cdot \text{месяц}^{-1}$ ;  $e_o$  — среднее значение максимальной упругости водяного пара, определяемое по температуре поверхности воды водоема,  $\text{гПа}$ ;  $e_{200}$  — среднее значение упругости водяного пара на высоте 200 см над водоемом,  $\text{гПа}$ ;  $u_{200}$  — средняя скорость ветра на высоте 200 см над водоемом,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $n$  — число дней в изучаемом интервале времени, обычно принимается месяц. Значения  $e_o$ ,  $e_{200}$  и  $u_{200}$  — среднемесячные, они получаются путем усреднения данных наблюдений, выполненных в различных точках над водоемом. Если таких данных нет, их можно рассчитать по данным наблюдений метеостанций, расположенных поблизости от водоема.

### 37.4.1 Значения коэффициента $N$

Коэффициент  $N$  представляет собой сочетание многих переменных, входящих в более сложные аэродинамические уравнения. Такими переменными являются: структура ветра, размер озера, шероховатость водной поверхности, устойчивость атмосферы, барометрическое давление, плотность и кинематическая вязкость

воздуха. Однако, как показывает опыт, если величины  $u$ ,  $e_o$  и  $e_a$  определены по данным измерений вблизи центра водоема и если  $e_a$  измерена в пределах «паровой подушки», то величина  $N$  относительно постоянна для водохранилищ самого разного размера. Исследования на озере Хефнер (площадь поверхности воды 900 га) [6] и в бассейне Боулдер на озере Мид, США (28 900 га) [8] показали, что коэффициент  $N$  оказался равным 0,0137 для обоих водоемов, при определении  $u$ ,  $e_o$  и  $e_a$  по данным измерений вблизи центра озера, а  $u$  и  $e_a$  — по данным измерений на высоте двух метров от поверхности воды.

Если  $e_a$  определяется по наблюдениям на берегу, за пределами «паровой подушки», величина  $N$  зависит от площади поверхности озера. Согласно Харбеку [9], такая зависимость имеет следующий вид:

$$N = \frac{0,291}{A^{0,05}}, \quad (37.13)$$

где  $A$  — площадь водной поверхности, м<sup>2</sup>. Стандартная погрешность расчета по этой формуле оказалась равной 16 % и, таким образом, ее нельзя использовать для определения значения  $N$  для отдельного озера. Однако эта зависимость может быть полезной с точки зрения предотвращения существенных погрешностей при определении величины  $N$  другими методами.

Коэффициент  $N$  можно определить также, если испарение оценивалось по методам водного или теплового баланса по месячным интервалам времени за год и более продолжительный период. В течение этого периода значение  $N$  следует рассчитывать для каждого месяца, исходя из среднего произведения  $u(e_o - e_a)$ . Как правило, величина  $N$  в течение всех сезонов года бывает постоянной. Более подробное описание методов, используемых при определении  $N$ , дано в публикации ВМО *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration* [10] (Измерение и оценка испарения и суммарного испарения).

Значение  $N$  и потери воды на фильтрацию можно вычислить для малых водоемов, если другие члены уравнения водного баланса могут быть определены за короткие промежутки времени. При этом принимаются два допущения:

- в течение периодов отсутствия притока или оттока падение уровня водоема происходит за счет двух факторов — испарения и фильтрации;
- когда произведение  $u(e_o - e_a)$  равно нулю, величина испарения ничтожно мала. Предпочтительнее брать для анализа те периоды, когда отсутствуют поверхностный приток или отток, хотя это не обязательно. Если приток и отток измерены, следует скорректировать наблюденные изменения уровня, однако обычно даже самые незначительные погрешности при измерении притока или оттока могут поставить под сомнение скорректированную величину изменения уровня. Периоды с дождями следует исключить.

Расчетный период следует выбирать таким образом, чтобы в начале и конце его уровни в озере определялись с максимальной точностью. Моменты, когда записи самописца указывают на наличие ветровых нагонов, нельзя выбирать в качестве начала или конца расчетных периодов, хотя в середине периода они могут иметь место. Для каждого выбранного периода рассчитывается изменение уровня  $\Delta h$  в см·сут<sup>-1</sup>, и за тот же период рассчитываются средние значения скорости ветра и разности упругости водяного пара. Графическая связь произведений  $u(e_o - e_a)$  и значений  $\Delta h$  должна быть линейной. Угловой коэффициент такой связи равен коэффициенту  $N$ , а отрезок представляет собой количество воды, потерянной на фильтрацию из озера. Средние суточные значения  $u$ ,  $e_o$  и  $e_a$  определяют по данным о ветре и температуре, а суточное испарение в см·сут<sup>-1</sup> рассчитывается по уравнению (37.11).

#### 37.4.2 *Ветер*

Непрерывные измерения скорости ветра следует проводить вблизи центра озера или водохранилища на высоте 2 м над водной поверхностью. Применяемые при этом анемометры описаны в разделе 9.5.7.

#### 37.4.3 *Температура поверхности воды*

Непрерывные измерения температуры поверхности воды следует проводить вблизи центра озера или водохранилища. Приборы, используемые для этих целей, описаны в разделе 9.5.5.

#### 37.4.4 *Влажность воздуха или упругость водяного пара*

Измерения влажности воздуха предпочтительно проводить вблизи центра водоема, на высоте 2 м над водной поверхностью. Приборы для измерения влажности воздуха описаны в разделе 9.5.6. Из-за трудностей обслуживания подобного оборудования в центре озера, влажность воздуха обычно измеряется на станции, расположенной на берегу с наветренной стороны. Различия в данных о влажности воздуха над озером и на берегу можно учесть в расчетах эмпирическим путем, как это указано в разделе 37.4.1.

#### 37.4.5 *Метод вихревой (турбулентной) диффузии*

Вертикальный поток турбулентного тепла (конвекция) и водяного пара (испарение) можно измерять прямо посредством мгновенных определений свойств турбулентных вихрей, проходящих через определенный измерительный горизонт. Средний вертикальный поток тепла при сухом воздухе равен нулю, в то время как изменяющаяся вертикальная составляющая ветра оказывает влияние на другие элементы. Для процесса вертикального переноса тепла (или влаги) необходимо, чтобы колебания температуры (или влажности) воздуха коррелировались с вертикальными изменениями скорости ветра.

При измерении испарения использование метода вихревой диффузии основано на пропорциональности между средней плотностью вертикального потока водяного пара и временем средних и мгновенных ковариаций скорости ветра и влажности воздуха в вертикальном направлении. Для этого необходимы специальные чувствительные датчики для измерения скорости ветра и влажности воздуха, которые нельзя использовать при стандартных полевых измерениях. Однако методы вихревой диффузии играют неоценимую роль в научных исследованиях и при тестировании других прямых и косвенных методов.

### 37.5 Совместное решение уравнений аэродинамики и теплового баланса

Возможно, что наиболее широко распространенный метод расчета испарения с поверхности озера по метеофакторам основан на совместном решении уравнений аэродинамики и теплового баланса [11–13]. В общем виде уравнение Пенмана [12] может быть представлено следующим образом:

$$E_i = \frac{R_n \Delta + E_a \gamma}{\Delta + \gamma}, \quad (37.14)$$

где  $E_i$  — испарение со свободной водной поверхности;  $\Delta$  — уклон кривой насыщения водяного пара при любой температуре  $\theta_a$ ;  $R_n$  — прямая радиация;  $\gamma$  — постоянная в психрометрическом уравнении;  $E_a$  — параметр, представляющий собой функцию скорости ветра; и  $(e_s - e_a)$ , где  $e_s$  — упругость водяного пара при температуре  $\theta_a$ ;  $e_a$  — фактическая упругость водяного пара при той же температуре. Постоянная в психрометрическом уравнении  $\gamma$  при выражении температуры в °С и 1 000-мб, равна 0,61. Прямую радиацию  $R_n$  можно рассчитать по уравнению

$$R_n = R_t (1 - r) (0,18 + 0,55 n/N) - \sigma \theta_a^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{e_a}) (0,1 + 0,9 n/N), \quad (37.15)$$

где  $R_t$  — среднее значение приходящей радиации, выраженное через эквивалент испарения, мин·сут<sup>-1</sup>;  $r$  — коэффициент отражения;  $n/N$  — относительная продолжительность солнечного сияния;  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана, также выраженная через эквивалент испарения, мин·сут<sup>-1</sup>;  $\theta_a$  — средняя температура воздуха (абсолютная);  $e_a$  — фактическая упругость водяного пара в воздухе, мм ртутного столба. Хотя может оказаться необходимым использовать это уравнение, предпочтение следует отдавать измеренным значениям солнечной и длинноволновой радиации.

Параметр  $E_a$  в уравнении (37.14) рассчитывается следующим образом:

$$E_a = (a + bu)(e_s - e_a), \quad (37.16)$$

где  $u$  — скорость ветра.

Среднесуточную температуру и относительную влажность можно использовать при определении средней упругости водяного пара  $e_a$  и среднего дефицита насыщения ( $e_s - e_a$ ). Наблюдения за ветром могут быть «привязаны» к соответствующему горизонту, используя степенной закон изменения скорости ветра с высотой

$$\left(\frac{u_1}{u_2}\right) = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^k, \quad (37.17)$$

где  $u_1$  — рассчитанная скорость ветра на заданном горизонте;  $u_2$  — наблюденная скорость ветра на высоте анемометров;  $z_1$  — высота, используемая в уравнении для расчета испарения;  $z_2$  — высота установки анемометра;  $k$  — постоянная, которая изменяется в зависимости от состояния устойчивости атмосферы и шероховатости подстилающей поверхности. Численное значение постоянной  $k$  можно рассчитать по экспериментальной формуле Тимофеева

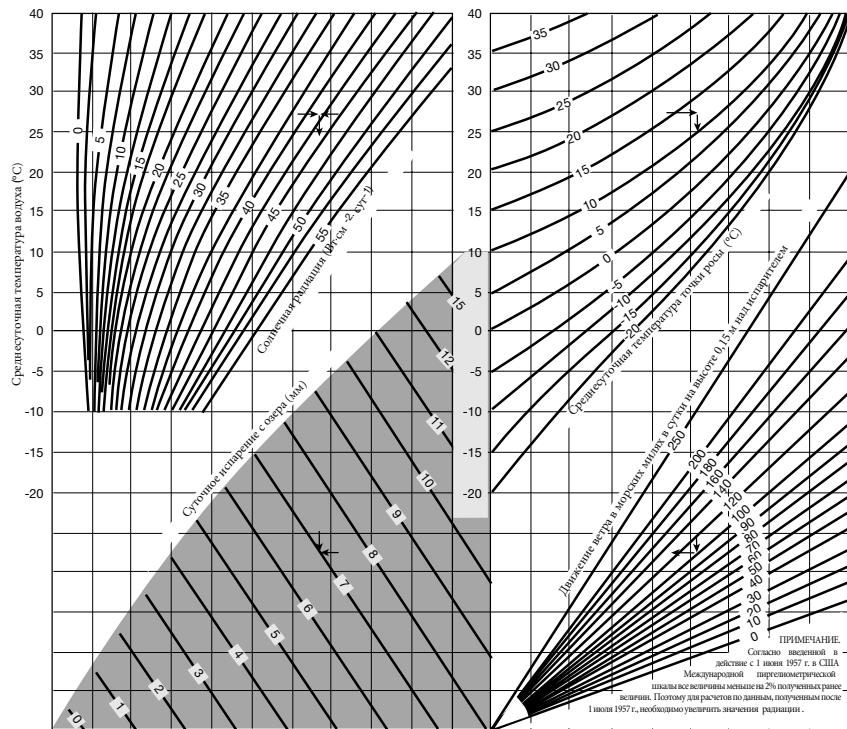


Рисунок 37.1 — Расчетные графики для определения испарения с озера

$$k = \frac{1}{11,5} \left( 1 - 0,42 \frac{\theta_0 - \theta_2}{u_1^2} \right), \quad (37.18)$$

где  $u_1$  — скорость ветра на высоте 1 м;  $\theta_0$  и  $\theta_2$  — соответственно температура поверхности воды и температура воздуха.

Аналогичный подход использован Колером и др. [2]; графическое выражение предложенной зависимости показано на рисунке 37.1. Для применения этого метода необходимы данные наблюдений за солнечной радиацией, температурой воздуха, точкой росы и скоростью ветра на высоте анемометра над испарителем класса А. При отсутствии наблюдений за солнечной радиацией ее можно оценить по

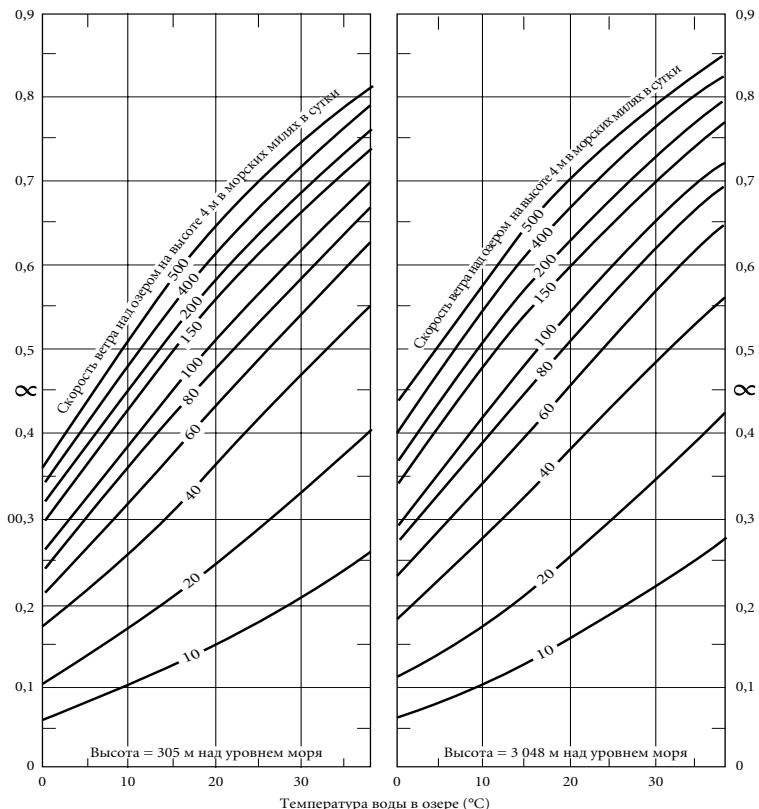


Рисунок 37.2 — Доля адвективного тепла, расходуемого на испарение

данным об относительной продолжительности солнечного сияния или облачности. Расчет испарения этим методом за короткие периоды времени можно выполнить лишь для очень мелких озер при незначительной адвекции тепла или ее полном отсутствии [2, 11, 12]. Для глубоких озер при наличии значительной адвекции тепла за счет притока и оттока в рассчитанную величину испарения необходимо вводить поправку, учитывающую прямую адвекцию тепла и изменение его запаса в водной массе. Эти два элемента рассматриваются в разделе 37.3 при описании метода теплового баланса. Однако не все адвективное тепло и тепло, выделяемое за счет изменения теплозапаса, расходуется на испарение. Та доля этого тепла, которая расходуется на испарение, может быть определена по зависимости, представленной на рисунке 37.2. Для применения этой зависимости необходимы данные наблюдений за температурой водной поверхности и скоростью ветра на высоте 4 м над ней. С помощью этого метода можно получить достаточно надежные величины испарения за недельные и месячные периоды, если выполнены оценки водной адвекции тепла и его изменений в массе.

### 37.6 Экстраполяция данных водных испарителей

Значения испарения, получаемые по испарителям, вкопанным в грунт, или наземным, зависят от характеристик испарителя. На показания вкопанных в грунт испарителей влияют скрытые утечки, скопления мусора на поверхности, и, кроме того, условия на границе испаритель—почва отличаются от свойств водной массы большого озера. В наземных испарителях происходит теплообмен через боковые стенки, а также имеют место и другие явления, которые отсутствуют на озерах. В плавучие же испарители вода может легко заливаться или выплескиваться из них, к тому же их установка и обслуживание дорого стоят.

Испарители имеют гораздо меньший запас тепла, чем озера, и дают несколько отличающийся годовой ход испарения. Экстремальные величины испарения по данным испарителей наступают раньше. Достоверные оценки испарения за год с озера можно получить путем умножения значения годового испарения, полученного по испарителю, на соответствующий поправочный коэффициент. Эти оценки будут надежными только в том случае, если можно принять, что любое тепло, поступившее в озеро в течение года, согласно уравнению баланса приведет к изменению общего запаса тепла. Поправочный коэффициент для определенного испарителя определяется путем сравнения его показаний с действительным испарением с озера, если такие данные имеются, или чаще путем сравнения с показаниями другого довольно большого испарителя, имитирующего условия озера (например вкопанные испарители с диаметром четыре и более метров). Этот коэффициент для отдельно взятого испарителя в некоторой степени зависит также от климатического режима местности, т. е. он будет разным в сухих и влажных условиях. Для того чтобы показания испарителя были близки к

действительному испарению с озера, его следует устанавливать таким образом, чтобы он не подвергался влиянию, которое озеро оказывает на окружающую среду. Следовательно, он должен быть установлен вблизи озера, но с подветренной стороны в отношении господствующего ветра. Установка испарителей на островах нежелательна.

Одним из методов определения климатической поправки к коэффициенту испарителя является сравнение его показаний с большими испарителями, проводимое в разных условиях. Этот метод применяется в СНГ, где сравниваются показания испарителя ГГИ-3000 и испарительного бассейна площадью 20 м<sup>2</sup>. Полученные таким образом переходные коэффициенты от испарителя к озеру для испарителя ГГИ-3000 колеблются в пределах от 0,75 до 1,00. Для расчета среднемесячного испарения такой коэффициент для плавучего испарителя ГГИ-3000 определяется по следующему уравнению:

$$\alpha = 0,8 \frac{e_o - e_{200}}{e'_o - e_{200}} \frac{\beta}{\gamma}, \quad (37.19)$$

где  $e_o$  — среднемесячная максимальная упругость водяного пара, гПа, определяемая по температуре поверхности воды водоема;  $e'_o$  — среднемесячная максимальная упругость водяного пара, гПа, определяемая по температуре поверхности воды в плавучем испарителе ГГИ-3000;  $e_{200}$  — среднемесячная упругость водяного пара на высоте 200 сантиметров над водной поверхностью, гПа;  $\beta$  — поправочный коэффициент на площадь водоема; а  $\gamma$  — коэффициент, который зависит от расстояния  $l$ , определяемого по среднему направлению ветра от берега к испарителю (разгон).

Отношение  $\beta/\gamma$  необходимо определять только для водоемов, расположенных в тундре, лесной и лесостепной зонах в случае установки испарителя на расстоянии свыше 500 метров от берега. Во всех остальных случаях это отношение принимается равным 1. Для водоемов приблизительно круглой или квадратной формы величина  $\beta$  определяется в зависимости от размеров площади водной поверхности по таблице 37.2.

Таблица 37.2  
Определение коэффициента  $\beta$

Площадь водоема (км <sup>2</sup> )	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0
Поправочный коэффициент $\beta$	1,03	1,08	1,11	1,18	1,21	1,23	1,26

Для водоемов неправильной формы (вытянутых, с островами и бухтами) площадь зеркала принимается равной кругу с диаметром, равным среднему

расстоянию  $\bar{l}$ , полученному как средневзвешенная с учетом повторяемости направлений ветра (%) по восьми румбам. Взвешенное расстояние можно определить по уравнению

$$\bar{l} = \frac{I}{100} \sum_{i=1}^{i=8} l_i N_i , \quad (37.20)$$

где  $N_i$  — повторяемость направления ветра по каждому из восьми румбов, %; коэффициент  $\gamma$  можно определить, пользуясь рисунком 37.3.

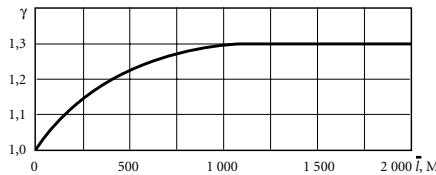


Рисунок 37.3 — Зависимость между коэффициентом  $\gamma$  и средневзвешенным расстоянием  $\bar{l}$

В СНГ среднесезонное (с момента весеннего вскрытия льда до осеннего ледостава) значение коэффициента для испарителя ГГИ-3000 рассчитывается по уравнению

$$\bar{\alpha} = 0,98 - 0,0007 E , \quad (37.21)$$

где  $E$  — среднемесячное испарение,  $\text{мм}\cdot\text{месяц}^{-1}$ , по данным измерений испарителя ГГИ-3000 в течение всего сезона наблюдений. Для расчета среднемесячного испарения этот коэффициент рассчитывается по уравнению

$$\bar{\alpha} = 1 - 0,063 E^{0,6} , \quad (37.22)$$

где  $E$  — среднесуточное испарение,  $\text{мм}\cdot\text{сут}^{-1}$ , по данным измерений за месяц.

Другим методом является введение поправки в данные испарителя, учитывающей потерю или поступление тепла через стенки и дно испарителя. Примером такого подхода является оценка испарения по данным испарителя класса А. Во влажном климате или во влажные сезоны температура воды в испарителе — выше температуры воздуха, и коэффициент испарителя может быть 0,80 и выше. В засушливые сезоны в аридных районах температура воды в испарителе ниже температуры воздуха, поэтому коэффициент может быть 0,60 и ниже. При равенстве температур воды и воздуха коэффициент принимается равным 0,70. Зависимости для оценки испарения с озера по данным испарителя класса А с

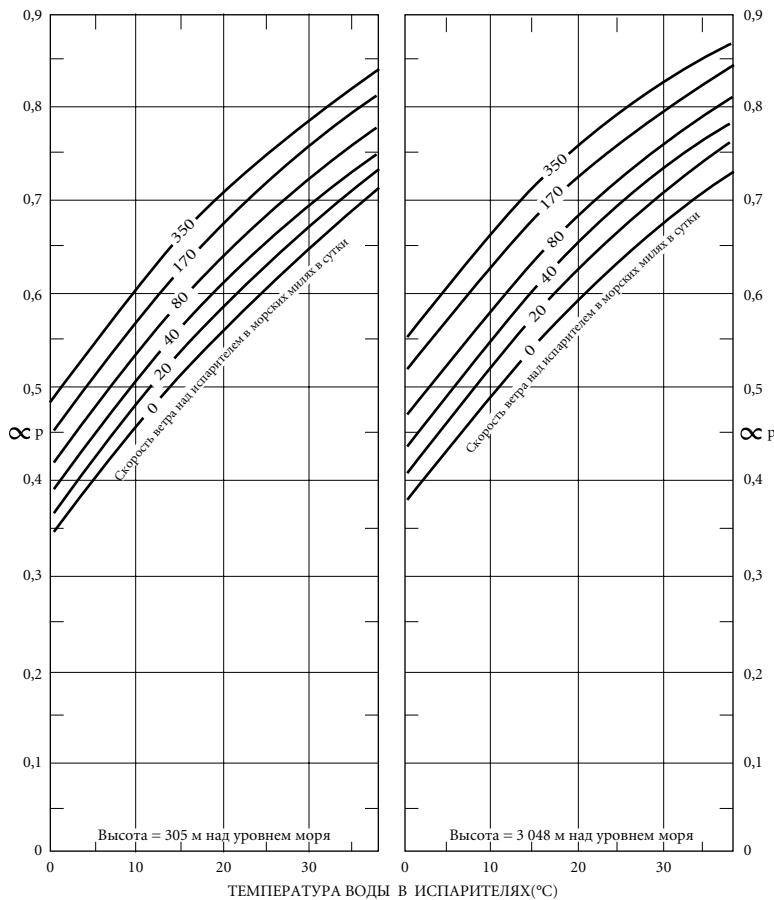


Рисунок 37.4 — Доля притока тепла в испаритель класса А, расходуемая на испарение

учетом поправки на потерю или поступление тепла показаны на рисунках 37.4 и 37.5. Поскольку скорость ветра значительно меняется с высотой, установка испарителей класса А на стандартной высоте является необходимым требованием.

Чтобы получить величины испарения с озера за короткие интервалы времени методом испарителей, необходимо также оценить адвекцию тепла и изменение запаса тепла, как это указано в разделе 37.3. Желательно размещать испарители вблизи озера или водохранилища, чтобы постоянно иметь источник расчетов альтернативных данных и для проверки расчетов, выполненных по методу теплового баланса или аэродинамическим методам.

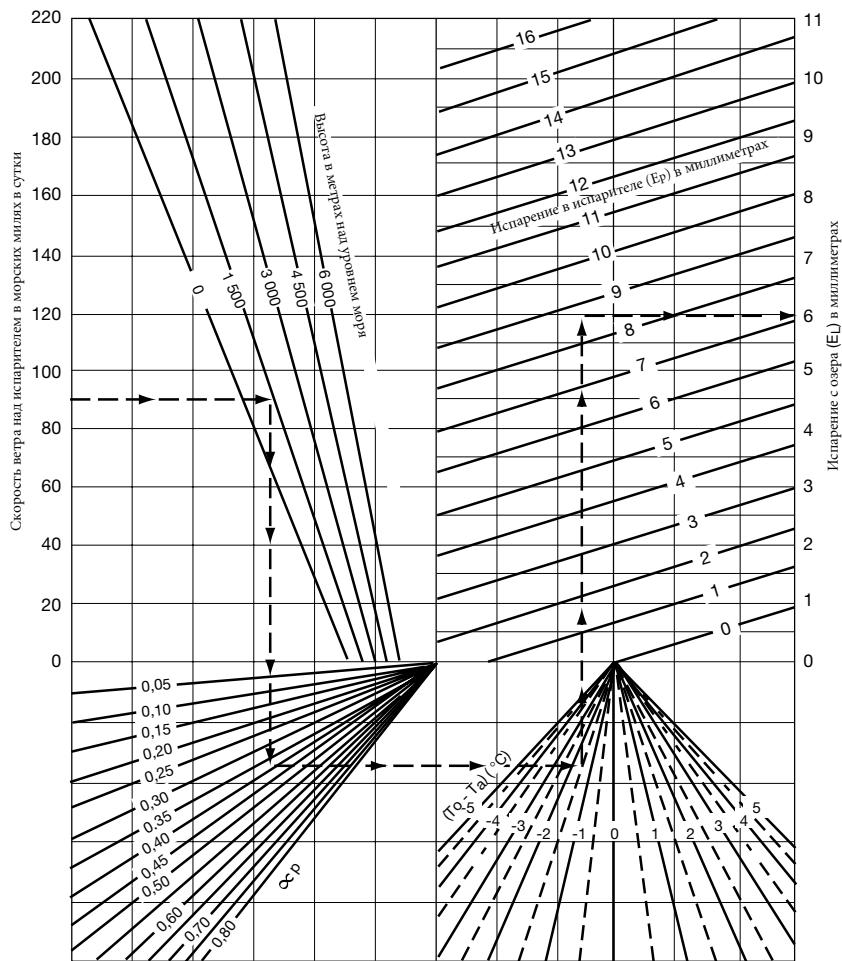


Рисунок 37.5 — Расчетные графики для перехода от показаний испарителя класса А к испарению с озера

#### Список литературы

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1990: *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений*. Пятое издание, ВМО-№ 8, Женева.

2. Kohler, M. A., Nordenson, T. J. and Baker, D. R., 1959: *Evaporation Maps for the United States*. U.S. Weather Bureau. Technical Paper 37.
3. Kohler, M. A., Nordenson, T. J. and Fox, W. E., 1955: *Evaporation from Pans and Lakes*. U.S. Weather Bureau, Research Paper 38.
4. World Meteorological Organization, 1985: *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation*. Operational Hydrology Report No. 22, WMO-No. 635, Geneva.
5. World Meteorological Organization, 1971: *Problems of Evaporation Assessment in the Water Balance* (C. E. Hounam). WMO/IHD Report No. 13, WMO-No. 285, Geneva.
6. U.S. Geological Survey, 1952: Water-loss investigations: Lake Hefner studies. Technical Report, *U.S. Geological Survey Circular* 229.
7. Vikulina, Z. A., 1973: Evaluation of the Penman method for the computation of evaporation from water bodies using observed data. *International Symposium on the Hydrology of Lakes*, 23–27 July 1973, Helsinki, IAHS-AIHS Publication No. 109.
8. U.S. Geological Survey, 1958: Water-loss investigations: Lake Mead studies. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 298.
9. Harbeck, G. E., 1962: A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 272-E, pp. 101–106.
10. World Meteorological Organization, 1966: *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration*. Technical Note No. 83, WMO-No. 201, Geneva.
11. Ferguson, J., 1952: The rate of natural evaporation from shallow ponds. *Australian Journal of Scientific Research*, No. 5, pp. 315–330.
12. Penman, H., 1956: Evaporation: an introductory summary. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Wageningen, Holland, pp. 9–29.
13. Slatyer, R. O. and McIlroy, I. C., 1961: *Practical Microclimatology*. UNESCO, Paris.



## ГЛАВА 38

# ОЦЕНКА СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ С РЕЧНОГО БАССЕЙНА

### 38.1       **Общие положения**

Под суммарным испарением обычно понимается общее количество испарившейся влаги с водных поверхностей, почвы, снега, льда, растительного покрова и других поверхностей, включая транспирацию. Суммарное испарение невозможно прямо измерить с заданной площади в естественных условиях, однако для его измерения с почвенных монолитов ограниченного размера используются лизиметры (раздел 9.3). Для оценки суммарного испарения с бассейна за длительный период времени можно использовать метод водного баланса, если все приходные и расходные элементы, за исключением суммарного испарения, могут быть измерены. При оценке суммарного испарения за короткие периоды для значимых по размерам площадей необходимо использовать эмпирические соотношения. Более подробно эта тема рассматривается в публикации ВМО *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation* [1] (Сборник примеров по оперативной оценке пространственного испарения).

### 38.2       **Потенциальное суммарное испарение**

По определению Торнтвейта, потенциальное суммарное испарение — «потери воды, которые будут иметь место при отсутствии дефицита почвенной влаги, потребляемой растениями» [2]. Пенман предложил модифицировать это определение, включив в него условие, что поверхность должна быть полностью покрыта зеленой растительностью. Такое модифицированное определение в целом удовлетворительно, однако оно теряет свой смысл для зимнего периода в северных широтах.

Чтобы получить потенциальное суммарное испарение, Пенман рекомендует значение годового испарения со свободной водной поверхности, рассчитанное по его уравнениям, умножить на коэффициент 0,75 (изменяющийся в пределах от 0,8 для лета до 0,6 для зимы). В определенных условиях потенциальное суммарное испарение может быть равно испарению со свободной водной поверхности. В некоторых случаях испарение со свободной водной поверхности можно использовать как индекс потенциального суммарного испарения, например при изучении условий формирования почвенной влаги в целях прогнозирования водоснабжения.

### 38.3 Действительное суммарное испарение

Характер соотношения между действительным и потенциальным суммарным испарением во многом определяется дефицитом влаги в почвенном профиле. Практически не осталось сомнений в том, что интенсивность истощения первоначально насыщенной, неоднородной толщи уменьшается во времени приблизительно по логарифмическому закону из-за изменений глубины корнеобитаемого слоя, емкости корнеобитаемой зоны, уклона, экспозиции поверхности и т. д.

### 38.4 Метод водного баланса

Для оценки суммарного испарения  $E_T$  можно использовать метод водного баланса, если осадки  $P$ , речной сток  $Q$ , глубокое просачивание  $Q_{ss}$  и изменение влагозапасов  $\Delta S$  можно измерить и оценить. Уравнение водного баланса имеет вид:

$$E_T = P - Q - Q_{ss} \pm \Delta S. \quad (38.1)$$

Годовое суммарное испарение с бассейна за гидрологический год можно вычислить как разницу между осадками и стоком, если с помощью гидрогеологических исследований установлено, что глубинное просачивание незначительно. Дата, выбранная в качестве начала и конца гидрологического года, должна относиться к засушливому сезону, когда влагозапасы относительно невелики и их изменениями из года в год можно пренебречь.

Если требуется оценить суммарное испарение за более короткий период, например за неделю или месяц, необходимо измерить запас воды в почве и речном русле. Это возможно только для малых водосборов и поэтому применение метода водного баланса для определения суммарного испарения за такие короткие периоды, как правило, ограничено экспериментальными площадками или водосборами размером в несколько акров.

При оценке среднегодового суммарного испарения изменения запасов влаги обычно не учитываются, и оно рассчитывается как разница между среднегодовыми осадками и среднегодовым стоком.

#### 38.4.1 Осадки

Количество осадков, выпадающих на поверхность всего водосбора или отдельную площадку, должно быть точно измерено с помощью осадкомерной сети. Для этой цели можно использовать обычные нерегистрирующие осадкомеры (раздел 7.3). Требуемое количество осадкомеров будет зависеть от ожидаемой изменчивости осадков на водосборе или в пределах площадки.

#### 38.4.2 Речной сток

Приборы и методы для непрерывных измерений речного стока описаны в главах 10 и 11.

### 38.4.3 *Изменение влагозапасов*

Изменение запасов влаги в почве определяется отдельно для насыщенной и ненасыщенной зон. Для этого необходимы измерения высоты уровня грунтовых вод в скважинах и измерения почвенной влаги в ненасыщенной зоне.

Высоту уровня грунтовых вод можно определить путем измерения расстояния от заданной отметки до поверхности воды в скважинах в конце каждого периода, для которого рассчитывается суммарное испарение. Изменение влагозапасов равно среднему изменению уровня воды, умноженному на удельную водоотдачу и площадь водосбора или площадки.

Распределение почвенной влаги от уровня насыщения (или точки постоянной влажности для аридных регионов) до поверхности земли следует измерять в конце каждого расчетного периода на ряде пунктов, расположенных в пределах водосбора (глава 15). Затем рассчитываются поступление или потери почвенной влаги за расчетный период.

### 38.4.4 *Глубокое просачивание*

Количество воды, поступившей на водосбор или ушедшой с него за счет глубинного просачивания, нельзя измерить непосредственно. Гидрогеологические исследования гидравлических характеристик подстилающих слоев должны дать представление о величине этого стока, который должен быть значительным при выборе экспериментальных полигонов. Этот элемент в силу своей малой величины не учитывается при исследованиях водного баланса.

### 38.5 *Метод теплового баланса*

Этот метод [3] можно применять для оценки суммарного испарения, когда разница между радиационным балансом и потоком тепла в почву значительна и превышает погрешности измерения (раздел 37.3). Этот метод применяется для оценки суммарного испарения за периоды не менее 10 дней. Для более коротких периодов оценка суммарного испарения методом теплового баланса затруднительна.

### 38.6 *Аэродинамический метод*

Применение этого метода [4] для оценки суммарного испарения затруднительно из-за отсутствия надежных методов определения коэффициента турбулентного обмена (раздел 37.4). Поэтому этот метод используется редко, только для приближенной оценки испарения.

В некоторых странах суммарное испарение вычисляется эмпирическими методами — по методу Пенмана и по формуле Торнгейта. Метод Пенмана применяется в условиях достаточного увлажнения, а формула Торнгейта [2] — в регионах с климатическими условиями, подобными условиям средних широт Атлантического побережья Соединенных Штатов Америки, для которых эта формула была получена.

В Содружестве Независимых Государств для оценки суммарного испарения применяется метод Константинова [5], основанный на наблюдениях за температурой и влажностью воздуха в психрометрической будке на высоте двух метров от земли. Этот метод применим, главным образом, для расчета средних многолетних значений месячного, сезонного или годового суммарного испарения.

### 38.7 Метод Пенмана—Монтейта

Используемое в этом методе уравнение (раздел 37.5, уравнение (37.14)) представляет собой комбинацию уравнения теплового баланса на поверхности суши и уравнения переноса водяного пара и тепла между поверхностью суши и атмосферой. В методе Пенмана—Монтейта используется аэродинамическое и поверхностное сопротивления. Первое характеризует влияние шероховатости поверхности суши на перенос тепла и массы, второе — сопротивление потоку водяного пара между испаряющейся поверхностью и воздухом. Поверхностное сопротивление для водных поверхностей равно нулю. При наличии растительности поверхностное сопротивление представляет собой биологический контроль транспирации и в значительной степени регулируется устьичным сопротивлением. Для высыхающих почв поверхностное сопротивление зависит от наличия почвенной влаги. Этот метод может быть использован применительно к часовым или суточным интервалам времени. Однако его использование ограничено, поскольку он требует наличия подмодели для оценки поверхностного сопротивления.

### 38.8 Метод Пристли—Тейлора (радиационный метод)

Метод Пристли и Тейлора [6] основан на том аргументе, что для больших увлажненных территорий радиационная составляющая испарения должна преобладать над advективной. Если при контакте с влажной поверхностью атмосфера остается насыщенной, перенос потока скрытого тепла (испарение) можно рассчитать по уравнению

$$\lambda E = (\varepsilon / (\varepsilon + 1))(Q^* - G), \quad (38.2)$$

где  $Q^*$  — фактическая прямая радиация;  $G$  — поток тепла в почве;  $\varepsilon = s\lambda/c_p$  при  $s$ , равном наклону кривой насыщения удельной влажности;  $\lambda$  — скрытая теплота испарения; а  $c_p$  — теплоемкость воды.

Для равновесного испарения была предложена формула

$$\lambda E = \alpha (\varepsilon / (\varepsilon + 1))(Q^* - G), \quad (38.3)$$

где  $\alpha = 1,26$  — эмпирическая константа. Это выражение используется для оценки потенциального испарения при отсутствии местной advекции. Оно также дает хорошие результаты при определении испарения с хорошо увлажненных территорий небольших размеров без влаголюбивой растительности.

### 38.9        Дополнительный метод

Дополнительный метод оценки испарения, впервые предложенный Буше [7], находит все более широкое применение для больших территорий, так как основан на использовании, главным образом, стандартных климатических данных.

Согласно этому методу потенциальное испарение является в равной степени как следствием фактического испарения, так и его причиной. Тепло и влага, выделяемые поверхностью, оказывают влияние на температуру и влажность воздуха над ней. Буше предложил использовать увеличение потенциального испарения, наблюдающегося при иссушении территории, в качестве меры интенсивности фактического испарения.

Если фактическое испарение  $E$  становится ниже потенциального  $E_{po}$  для обширного увлажненного региона, то количество дополнительного тепла  $Q$  можно оценить по формуле

$$\lambda E_{po} - \lambda E = Q. \quad (38.4)$$

Это изменение тепла повлияет на температуру, влажность, турбулентность и, следовательно, на испарение. Если площадь настолько велика, что изменение в запасах тепла не приведет к изменению обмена теплом между новой воздушной массой и прилегающими слоями, дополнительное тепло  $Q$  должно быть равно увеличению компонента  $\lambda E_p$  т. е. потенциального испарения с высыхающей площади.

Отсюда

$$\lambda E_p - \lambda E_{po} = Q. \quad (38.5)$$

Поэтому

$$E + E_p = 2E_{po}. \quad (38.6)$$

В большинстве случаев нахождение подобных соотношений (см., например, Мортон [8]) было связано с поиском соответствующих выражений для  $E_p$  и  $E_{po}$ . Эти характеристики можно вычислить соответственно по выражениям Пенмана (раздел 37.5) и Пристли—Тейлора (раздел 38.8). Данный подход не учитывает адвекцию и предполагает величину  $Q$  неизменной. Кроме того, не учитывается вертикальный обмен теплом с воздушными массами, приносимыми в процессе крупномасштабного атмосферного переноса.

### Список литературы

1. World Meteorological Organization, 1985: *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation*. Operational Hydrology Report No. 22, WMO-No. 635, Geneva.

2. Thornthwaite, C. W. and Holzman, B., 1942: *Measurement of Evaporation from Land and Water Surfaces*. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin 817.
3. World Meteorological Organization, 1966: *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration*. Technical Note No. 83, WMO-No. 201, Geneva, pp. 95–102.
4. World Meteorological Organization, 1966: *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration*. Technical Note No. 83, WMO-No. 201, Geneva, pp. 102–115.
5. Konstantinov, A. R., 1966: *Evaporation in Nature*. Translated for the U.S. Department of Commerce and National Science Foundation by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem. Available from the U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 22151.
6. Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J., 1972: On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, No. 100, pp. 81–92.
7. Bouchet, R. J., 1963: *Evapotranspiration réelle et potentielle: signification climatique*, General Assembly, Committee for Evaporation, 19–31 August 1963, Berkeley, California, IASH Publication No. 62, pp 134–142.
8. Morton, F. I., 1982: Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology*, No. 66, pp 1–76.

## ГЛАВА 39

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 39.1        **Общие положения**

Понятие «моделирование гидрологических систем» обычно означает применение математических и логических процедур, которые устанавливают количественные соотношения между характеристиками стока (выход) и стокоформирующими факторами (вход). Это самое общее определение, которое включает весь спектр методических подходов. Крайними из них являются, с одной стороны, полностью эмпирические подходы типа «черного ящика», не предназначенные для моделирования процессов, происходящих внутри бассейна и определяющих его реакцию, а устанавливающие соответствие потоков влаги на входе в бассейновую систему и выходе из нее. С другой стороны — подходы, предусматривающие решение сложных систем уравнений, базирующихся на физических закономерностях и теоретических концепциях, определяющих гидрологические процессы — так называемые «гидродинамические модели» [6, 2]. Между этими двумя крайними подходами находятся различные концептуальные модели. Эти модели представляют собой логическое объединение простых концептуальных элементов, например линейных и нелинейных резервуаров и потоков, которые воспроизводят процессы, происходящие в бассейне. И модели типа «черного ящика», и концептуальные, и гидродинамические модели дают на выходе результаты без соответствующей оценки вероятностей наступления события. По этой причине их часто относят к детерминированным моделям.

Однако иногда считается, что термин «моделирование гидрологических систем» включает в себя стохастическое моделирование, при котором основное внимание уделяется воспроизведению статистических характеристик гидрологических временных рядов без попыток моделирования соотношений вход-выход.

Полезность применения при определенных обстоятельствах чисто эмпирических и типа «черного ящика» соотношений была и впредь будет доказана, но они являются причиной серьезной ошибки, когда возникает необходимость опереться на них при не известных прежде обстоятельствах. Модели, которые посредством теоретических концепций обрабатывают различные и взаимодействующие гидрологические процессы, представляются более надежными в

таких экстремальных условиях, и экспериментирование с ними обещает большие научные прерспективы. Любая попытка классифицировать детерминированные модели в качестве гидродинамических, концептуальных или «черного ящика» требует решения вопроса относительно степени эмпиризма каждой из них. Однако считается необходимым следовать такой классификации, имея в виду детерминированные модели.

Прогресс в моделировании гидрологических систем тесно связан с появлением ЭВМ и технологий их использования. Наличие ЭВМ и развитие соответствующих численных методов дают возможность гидрологам выполнять сложные много-вариантные вычисления с использованием большого количества данных. Моделирование речного стока становится важным элементом, используемым при планировании и управлении системами водоснабжения и контроля, а также при предоставлении речных прогнозов и прогнозов службы предупреждения.

Природа моделирования и необходимость постоянного совершенствования компьютерного программирования делают практически невозможным включение компьютерных разработок в состав настоящего *Руководства*. Многие ссылки в нем приводятся в качестве руководящего материала по специфическим аспектам моделирования, но не являются попыткой обеспечить пользователей готовыми к использованию программами по реализации многочисленных существующих в настоящее время комбинаций модель-компьютер.

### 39.2        Модели типа «черного ящика» (системный подход)        [J04]

Речной бассейн может рассматриваться как динамическая система с сосредоточенными параметрами, которые не изменяясь в пределах бассейна, преобразуют входные факторы — жидкые и твердые осадки — в гидрограф стока с бассейна. Тот же подход принимается и для участка реки, кроме случаев, когда приток в точке (точках), расположенной вверх по течению, должен трактоваться как дополнительный входной фактор. Схематически такие системы могут быть представлены в виде, показанном на рисунке 39.1, где:  $P(t)$  — вход,  $Q(t)$  — выход — оба фактора являются функциями времени  $t$ . С точки зрения теории динамических систем гидрологические системы ведут себя как линейные, если они удовлетворяют принципу суперпозиции, когда реакция системы на объединенное воздействие входных факторов адекватна сумме откликов на воздействие каждого из них в отдельности и параметры системы не зависят от реакции системы. Предпосылка, что гидрограф оттока с водосбора можно предсказать только по данным об осадках и снеготаянии, включает предположение о том, что изменчивость других естественных входных параметров, таких, как суммарное испарение, невелика или описывается известной функцией времени [3].

Общее выражение для соотношения между входом  $P(t)$  и выходом  $Q(t)$  линейной динамической системы с сосредоточенными параметрами может быть записано в виде

$$\begin{aligned} a_n(t) \frac{d^n Q}{dt^n} + a_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} Q}{dt^{n-1}} + \dots + a_1(t) \frac{dQ}{dt} + a_o(t) Q = \\ b_n(t) \frac{d^n P}{dt^n} + b_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} P}{dt^{n-1}} + \dots + b_1(t) \frac{dP}{dt} + b_o(t) P, \end{aligned} \quad (39.1)$$

где коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  являются параметрами, характеризующими свойства системы. Решение уравнения (39.1) относительно нулевых начальных условий приводит к следующему выражению:

$$Q(t) = \int_o^t h(t - \tau) P(\tau) d\tau, \quad (39.2)$$

где функция  $h(t, \tau)$  представляет отклик системы за время  $t$  на единичный входной импульс за время  $\tau$ .



Рисунок 39.1 — Система «черного ящика»

Существуют многочисленные приближения для представления гидрологических систем в виде уравнений, включающих функцию влияния  $h(t, \tau)$ . Она может быть выражена через коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$ . Если эти коэффициенты постоянны, то система инвариантна во времени и уравнение (39.2) превращается в интеграл Диогамеля

$$Q(t) = \int_o^t h(t - \tau) P(\tau) d\tau. \quad (39.3)$$

Можно показать, что концепция единичного гидрографа и методы расчета трансформации стока, обсуждаемые в разделе 33.3, являются всецело примерами линейных динамических систем, отвечающих принципу суперпозиции.

Нелинейные системы — системы, для которых принцип суперпозиции не выполняется. В общем виде отклик нелинейной системы с сосредоточенными параметрами на входной импульс может выражаться либо обыкновенным нелинейным дифференциальным уравнением, либо следующим уравнением:

$$\begin{aligned} Q(t) = \int_o^t h(\tau) P(t - \tau) d\tau + \int_o^t \int_o^t h(\tau_1, \tau_2) P(t - \tau_1) P(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \dots \\ + \int_o^t \dots \int_o^t h(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) P(t - \tau_1) P(t - \tau_2) \dots P(t - \tau_n) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n + \dots, \end{aligned} \quad (39.4)$$

где  $h(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  — функция, выражающая постоянные во времени характеристики физической системы. Она аналогична функции влияния в уравнении (39.2). Первый член правой части уравнения (39.4) описывает линейные свойства системы, второй — определяет квадратические свойства, третий — кубические и т. д.

В квазилинейных системах и тех, которые могут быть названы моделями с полусосредоточенными параметрами, в некоторой степени учитывается пространственная изменчивость [4].

### 39.3 Концептуальные модели [J04]

Модели, обсуждавшиеся в предыдущем разделе, используют только самые общие идеи о преобразовании входных данных в гидрограф стока. В ряде случаев такой подход не является удовлетворительным. Данный тип анализа обычно не дает хороших результатов при моделировании системы водных ресурсов для случаев, включающих сложный характер трансформации осадков в сток так же, как и при многих видах исследований водных ресурсов, когда необходимо оценить влияние на них изменений погоды, землепользования и других видов хозяйственной деятельности. В результате, получил развитие подход к моделированию, включающий решение систем уравнений, в основу которых положены различные концепции описания физических процессов формирования стока. Обычно такие модели относятся к типу концептуальных.

Одним из наиболее трудных аспектов применения концептуальных моделей является калибровка выбранной модели применительно к конкретному водосбору. Большинство параметров модели определяются итерационным способом на основе исторических рядов входных и выходных данных. Из-за ограниченности данных, недостатка модели и наличия внутренних связей между параметрами даже небольшое увеличение их количества способно значительно повысить трудности, связанные с тарированием модели. Поэтому необходимо, чтобы число параметров соответствовало степени достоверности исходных данных и требуемой точности. Другими словами, современные концепции, основанные на теоретических достижениях, обычно требуют упрощения для удобства использования.

Большое число концептуальных моделей описано в литературе, например [5]. В данном случае признано уместным ограничить рассмотрение этих моделей кратким описанием трех из них, наиболее подходящих для рассмотрения в данном Руководстве.

#### 39.3.1 Модель Гидрометцентра бывшего СССР

В модели используются концептуальные подходы для определения потерь воды, поступающей на водосбор, и затем системный подход к расчету объемов стока в

замыкающем створе водосбора [1]. Скорость водоотдачи с водосбора  $P_i$  в виде поверхностного стока рассчитывается из уравнения

$$P = h - E - I, \quad (39.5)$$

где  $h$  — средняя интенсивность осадков в течение выбранного интервала времени (6 часов, 24 часа и т. д.);  $E$  — то же для испарения;  $I$  — средняя интенсивность инфильтрации (уравнение (39.8)). Средняя величина испарения с поверхности бассейна определяется по уравнению

$$E = (k_1 D + k_2 D_u) e^{-d/W}, \quad (39.6)$$

где  $D$  — дефицит влажности воздуха;  $u$  — скорость ветра,  $k_1, k_2$ ;  $W$  — эмпирические параметры. Дефицит влажности почвы  $d$  определяется из уравнения водного баланса

$$d = W - \int_{t_o}^t (E + Q + I - h) d\tau, \quad (39.7)$$

где  $Q$  — отток;  $t_o$  — время, когда  $d = 0$ . Средняя интенсивность инфильтрации определяется из уравнения

$$I = \frac{d}{k_3} + i_o, \quad (39.8)$$

где  $k_3$  и  $i_o$  — эмпирические параметры.

Поверхностный сток вычисляется по величине водоотдачи с водосбора

$$P_s = P_r \left[ 1 - e^{-m} \int_{t_n}^t P dt \right], \quad (39.9)$$

где  $t_n$  — время начала образования стока;  $r$  и  $m$  — эмпирические параметры. Подземный сток рассчитывается по уравнению

$$P_i = i_o e^{-k_4 d}, \quad (39.10)$$

где  $k_4$  — эмпирический параметр.

Подаваемые на вход модели поверхностный и подземный сток трансформируются отдельно таким образом, что гидрограф оттока получается с помощью уравнения

$$Q(t) = \int_{t_o}^t h_1(t-\tau) P_s(\tau) d\tau + \int_{t_o}^t h_2(t-\tau) P_i(\tau) d\tau, \quad (39.11)$$

в котором  $h_1(t)$  и  $h_2(t)$  — функции влияния (см. уравнение (39.3)).

Анализ уравнений (39.5)–(39.11) показывает, что модель содержит 12 эмпирических параметров:  $k_1, k_2, k_3, k_4, i_o, m, r, W$  и 4 параметра функции влияния.

### 39.3.2 Модель Сакраменто

[J04]

Модель Сакраменто была разработана в Национальном центре службы речных прогнозов в Сакраменто, США [7]. Эта модель включает сложный алгоритм расчета влажности почвы, предназначенный для получения значений объемов нескольких компонентов речного стока, в то время как достаточно простой и почти полностью эмпирический подход используется для преобразований этих входных данных в гидрограф стока. Почвенная толща разделена на две части — верхнюю зону и нижнюю зону, — каждая из которых имеет емкости для капиллярной и свободной воды. Капиллярная вода тесно связана с почвенными частицами и извлекается из почвы только в процессе испарения. Гравитационная вода согласно принятому условию стекает в процессе дренирования вертикально вниз и в горизонтальном направлении. Размеры емкостей для капиллярной и гравитационной воды в каждой зоне рассматриваются в качестве модельных параметров. Вода, поступившая в зону, суммируется с запасом капиллярной влаги до тех пор, пока не превысит капиллярную влагоемкость; излишек воды в этом случае идет на пополнение запаса свободной воды.

Одна часть осадков любого вида немедленно поступает в русловую систему, сразу формируя сток. Это те осадки, которые выпадают в пределах русловой системы, а также на прилегающих водонепроницаемых площадях. Размеры этих площадей в модели изменяются во времени. Как дождевые осадки, так и осадки, образовавшиеся в результате снеготаяния, кроме тех, которые перешли непосредственно в прямой сток, проникают в верхнюю зону. Гравитационная вода в верхней зоне расходуется либо на внутриводный сток, либо на фильтрацию в нижнюю зону. Если пополнение влаги в верхней зоне происходит быстрее ее истощения, излишек воды расходуется на поверхностный сток. Свободная вода в нижней зоне перераспределяется между первичной (медленный дренаж) и вторичной емкостями. Рисунок 39.2 иллюстрирует основные особенности этой модели. Фильтрация из верхней зоны в нижнюю определяется по уравнению

$$\text{PRATE} = \text{PBASE} \left[ 1 + \text{ZPERC} * \text{RDC}^{\text{REXP}} \right] \frac{\text{UZFWC}}{\text{UZFWM}}, \quad (39.12)$$

где PRATE — скорость фильтрации; PBASE — скорость, с которой будет происходить фильтрация в случае насыщения нижней зоны и при неограниченном запасе влаги в верхней зоне. Численно она равна максимальной скорости оттока из нижней зоны и рассчитывается как сумма запасов свободной воды в первичной и вторичной емкостях, каждый из которых умножается на свой коэффициент оттока. RDC — отношение дефицита влаги нижней зоны к влагоемкости. То есть  $\text{RDC} = 0$ , когда

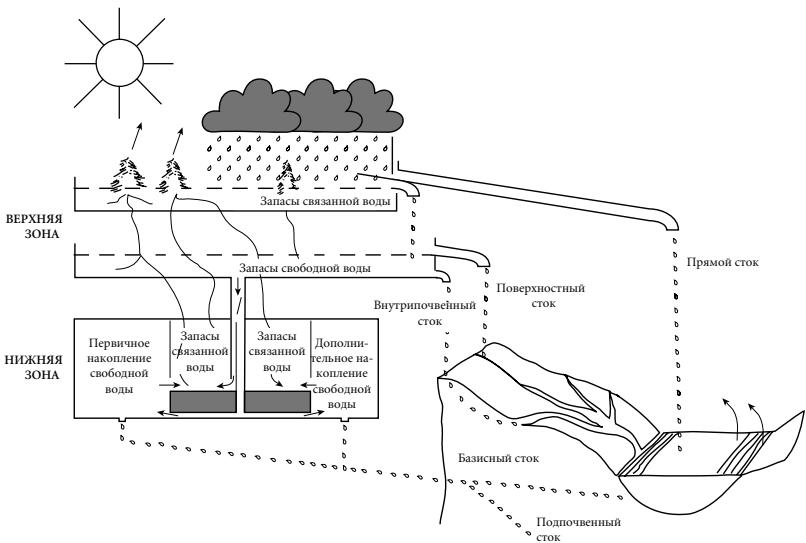


Рисунок 39.2 — Структура модели Сакраменто

нижняя зона полностью насыщена и  $RDC = 1$ , когда она полностью сухая. ZPERC — параметр модели, который определяет диапазон изменений скорости фильтрации. При неограниченной подаче свободной воды в верхнюю зону скорость фильтрации будет изменяться от PBASE (нижняя зона насыщена) до  $PBASE(1 + ZPERC)$ , когда нижняя зона опорожнена. REXP — параметр модели, определяющий форму кривой зависимости между максимальным и минимальным значениями скорости фильтрации, указанными выше. UZFWC — содержание свободной влаги в верхней зоне. UZFWM — влагоемкость верхней зоны. Отношение UZFWC/UZFWM является движущей силой влагообмена в верхней зоне. Когда верхняя зона опорожнена, фильтрация не происходит. При заполненной верхней зоне скорость фильтрации будет регулироваться дефицитом влаги в нижней зоне.

Вышеуказанное уравнение является стержнем всей модели. Оно взаимодействует с другими компонентами модели таким образом, что управляет движением воды во всех частях почвенного профиля как выше, так и ниже границы раздела фильтрационного потока и, в свою очередь, контролируется в процессе передвижения воды во всех частях почвенного профиля. Скорость суммарного испарения оценивается при помощи метеорологических переменных и по данным водных испарителей. Для этого могут использоваться или ежедневные, или полученные за длительный период средние значения. Суммарный расход влаги на испарение

определяется величиной испаряемости, умноженной на коэффициент, который является функцией календарной даты, отражающей состояние растительного покрова. Влага, рассчитанная в процессе моделирования, расходуется прямо или косвенно на суммарное испарение либо из различных аккумулирующих емкостей, либо из рус洛вой сети. Потери на испарение распределяются в соответствии с иерархией приоритетов и ограничиваются наличием влаги так же, как и принятыми требованиями к расчетам.

Продвижение влаги через почвенную толщу является непрерывным процессом. Скорость стекания в любой точке варьируется в зависимости от скорости притока влаги и запаса влаги в соответствующем емкостном элементе. Этот процесс воспроизводится на основании расчета квазилинейных уравнений. Расчет дренирования и фильтрации воды на каждом временном шаге основан на неявном допущении того, что перемещение влаги в течение конкретного временного шага определяется условиями, сложившимися к началу этого шага. Это допущение приемлемо только в том случае, если временной шаг выбран достаточно коротким. Длительность шага в модели зависит от объема воды. То есть длина шага выбирается таким образом, чтобы не более 5 мм влаги участвовало в каждом отдельном вычислительном цикле.

Пять составляющих речного стока рассчитываются в модели. Три компонента стока верхней зоны (склоновый, поверхностный и внутриводный) суммируются и преобразуются в единичный гидрограф (раздел 33.3). Два компонента нижней зоны — первичный и вторичный базисный сток, непосредственно добавляются к гидрографу оттока, полученному по трем другим составляющим. Предусмотрен также расчет результирующего гидрографа стока с переменными расчетными коэффициентами.

### 39.3.3 Резервуарная модель (танк-модель)

[J04]

Эта модель разработана в Национальном исследовательском центре по предотвращению стихийных бедствий в Токио, Япония [8]. Как следует из названия модели, почвенная толща представляется в виде системы резервуаров, расположенных один над другим, как изображено на рисунке 39.3(a). Предполагается, что все дождевые осадки и талые воды поступают в самый верхний резервуар. Каждый резервуар имеет одно выпускное отверстие в дне и одно или два боковых отверстия, расположенных на некотором расстоянии от дна. Вода, вытекающая через донное отверстие любого из резервуаров, поступает в следующий нижележащий резервуар; исключение составляет самый нижний резервуар, т. к. поступившая в него вода является потерей для системы. Вода, вытекающая из любого резервуара через боковое отверстие (боковой сток), рассматривается как входной импульс по отношению к руслоевой системе. Количество и размер резервуаров, а также расположение выходных отверстий являются параметрами модели.

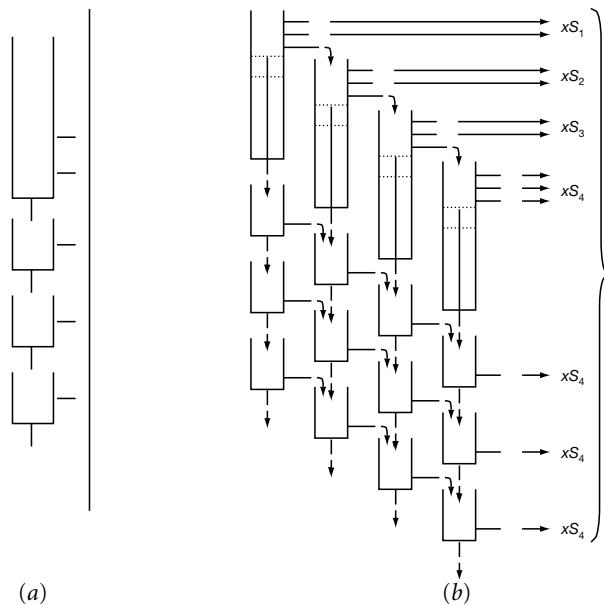


Рисунок 39.3 — Резервуарная модель (танк-модель)

Описанная конфигурация резервуаров применяется для моделирования процес-са осадки-сток во влажных районах; для бассейнов, расположенных в аридных и полуаридных районах, требуется более сложное расположение резервуаров, как показано на рисунке 39.3(б). Если для каких-либо водосборов характерны продолжительные засушливые периоды, то в модель включаются два или более параллельно расположенных рядов резервуаров. Сток из самого нижнего резервуара каждого ряда соответствует стоку из отдельного резервуара в простой резервуарной модели. Из каждого резервуара определенная доля воды поступает в виде бокового стока в соответствующий резервуар соседнего ряда, а из последнего ряда резервуаров боковой сток поступает непосредственно в русловую сеть. Из самых верхних резервуаров каждого ряда дополнительно предусмотрен боковой сток непосредственно в русловую сеть. Предполагается, что каждый ряд резервуаров представляет определенную зону водосбора, причем самый нижний соответствует зоне, ближайшей в русле. По мере изменения гидрологических условий от влажных к засушливым, в зависимости от сезона, зона, ближайшая к русловой сети, может оставаться относительно влажной, в то время как более удаленная зона становится достаточно сухой. Разработчики модели не считают, что представленное описание емкостных элементов модели является совершенно реалистичным, скорее принятное

расположение резервуаров является приближением к методу конечных разностей. Более того, математические выражения, описывающие движение воды через резервуары, имеют сходство с концепциями классической гидрологии.

В модели различаются два типа вод — связанная вода (почвенная влага) и свободная вода, которая может перемещаться как вертикально вниз, так и в горизонтальном направлении. Предусмотрено также, что свободная вода пополняет влагозапас почвы за счет действия капиллярных сил. Расчет потерь на суммарное испарение с бассейна основан на данных по измеренному или вычисенному суточному испарению, влагозапасам с учетом иерархии приоритетов для различных емкостных элементов.

Основная расчетная схема в пределах каждого резервуара включает функцию сброса, определяемую как

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x, \quad (39.13)$$

где  $x$  — объем резервуара;  $t$  — время. Отток воды за единицу времени  $\Delta t$  тогда будет равен  $(1 - e^{-\alpha \Delta t}) x$ . Величина  $(1 - e^{-\alpha \Delta t})$  рассчитывается для каждого выпускного отверстия за нужный интервал времени на основании величины  $\alpha$ .

Для каждого интервала времени в модели предусмотрен следующий порядок вычислений:

- a) для верхнего резервуара:
  - i) исключение суммарного испарения;
  - ii) перевод свободной воды в почвенную влагу;
  - iii) добавление дождевых осадков или талых вод;
  - iv) расчет притока в русловую сеть (боковой сток) и просачивания (сток вниз) и исключение этих величин из объемов свободной воды;
- b) для нижерасположенных резервуаров:
  - i) исключение суммарного испарения в зависимости от иерархии приоритетов;
  - ii) перевод свободной воды в почвенную влагу;
  - iii) добавление воды, просочившейся из верхнего резервуара;
  - iv) расчет притока в русловую сеть (боковой сток) и просачивания (сток вниз) и исключение этих величин из объемов свободной воды.

Приток в русловую сеть — это выходной результат по блоку расчета влажности в модели. Гидрограф стока строится по данным о притоке воды в русловую сеть в предположении, что

$$Q = KS^2, \quad (39.14)$$

где  $Q$  — сток;  $S$  — запас воды в русловой сети;  $K$  — дополнительный параметр модели. Ограничение накладывается на соотношение  $dQ/dS$ , чтобы сток в реке не мог превысить запас воды в русле.

Одной из интересных особенностей модели является то, что изменение значений параметров модели может приводить к существенному изменению структуры модели.

### 39.3.4        *Выбор моделей*

Выбор моделей не ограничивается моделями, описанными выше. Иногда бывает трудно установить относительные достоинства и недостатки моделей, разработанных для оперативных целей. С выбором модели, пригодной для конкретных гидрологических условий, приходится сталкиваться при планировании управления и использования водных ресурсов в оперативной гидрологической деятельности. При выборе моделей целесообразно учитывать следующие факторы и критерии:

- a) цели и эффективность результата моделирования, например: гидрограф стока, прогноз паводков, качества воды, управление водными ресурсами;
- b) климатические и физико-географические условия водосбора;
- c) длительность рядов наблюдений за различными видами данных;
- d) качество данных как во временном, так и в пространственном аспектах;
- e) наличие ЭВМ и ее рабочие характеристики, важные и для разработки, и для использования модели;
- f) возможность переноса параметров моделей с более мелких водосборов на более крупные бассейны;
- g) возможность модернизации модели на основе учета текущих гидрометеорологических условий.

В Международном проекте ВМО по взаимосравнению концептуальных моделей, используемых в оперативных службах гидрологических прогнозов, который был завершен в 1974 г., приводятся общие сведения и рекомендации по выбору и применению концептуальных моделей в различных гидрологических условиях. Десять оперативных концептуальных гидрологических моделей были испытаны на шести речных водосборах с различными климатологическими и географическими условиями. Результаты этого проекта обобщены в *Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting* [5] (Взаимосравнение концептуальных моделей, используемых в оперативном гидрологическом прогнозировании). Они должны рассматриваться лишь в качестве примера.

### 39.4        *Гидродинамические модели*

Гидрологические исследования, выполненные в последние годы, позволили получить представление о физических процессах, охватывающих весь гидрологический цикл. Подобно этому, высокие технологии, применяемые при обработке рядов данных большой продолжительности и их обобщении во времени и пространстве, соединившись с возможностями современных компьютеров, позволяют ускорить обработку гидрологических и метеорологических данных всех видов. Все это способствовало усовершенствованию третьего типа моделей — гидродинамических.

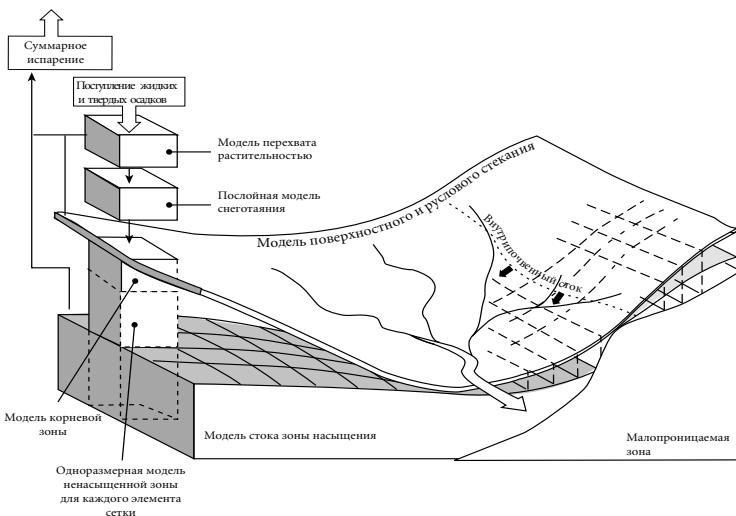


Рисунок 39.4 — Структура Европейской гидрологической системы

Гидродинамические модели основаны на уточненной пространственной дискретизации элементов бассейна и численном интегрировании уравнений сохранения массы и количества движения, которые описывают физические процессы, происходящие в пределах бассейна.

Такие модели обеспечивают основу для полного использования разнообразной информации, имеющей отношение к физическим процессам, происходящим на водосборе.

Так как в основе гидродинамических моделей лежат физические законы, управляющие процессами на водосборе, экстраполяция за пределы области тарирования модели может быть выполнена более уверенно, чем при использовании концептуальных моделей.

Европейская гидрологическая система (ЕГС) [9] является примером гидродинамической модели. Она представлена на рисунке 39.4. ЕГС — это модель с распределенными параметрами, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих физические процессы в бассейне: задержание осадков растительностью, суммарное испарение, склоновый и русловой сток, движение воды в зоне аэрации и зоне насыщения и снеготаяние.

Блок, описывающий процесс задержания осадков растительностью, представлен в виде варианта модели Руттера [10], которая позволяет определять интенсивность изменения количества влаги, задержанной поверхностью растительного покрова:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = Q - Ke^b (C - S), \quad (39.15)$$

$$\text{где } Q = \begin{cases} P_1 P_2 (P - E_p) C/S, & \text{когда } C < S, \\ P_1 P_2 (P - E_p), & \text{когда } C \geq S; \end{cases}$$

$C$  — слой воды, задержанной поверхностью растительного покрова;  $S$  — водоудерживающая способность растительного покрова;  $P$  — интенсивность выпадения жидких осадков;  $P_1$  — доля площади, покрытой растительностью;  $P_2$  — отношение общей площади листовой поверхности к площади, покрытой растительностью;

$$P_1 P_2 = P_1 P_2, \quad \text{когда } P_2 < 1,$$

$$P_1 P_2 = P_1, \quad \text{когда } P_2 \geq 1;$$

$E_p$  — интенсивность потенциального испарения;  $K$  и  $b$  — фильтрационные параметры;  $t$  — время.

Для расчета интенсивности действительного суммарного испарения используется уравнение Пенмана—Монтеята [11]

$$E_a = \frac{\Delta R_n + \frac{\varphi C_p v_e}{r_a}}{\lambda [\Delta + \gamma (17 v_s / r_a)]}, \quad (39.16)$$

где  $\varphi$  — плотность воздуха;  $\lambda$  — скрытая теплота парообразования;  $E_a$  — интенсивность действительного суммарного испарения;  $R_n$  — суммарная радиация за минусом теплопотока в почву;  $\Delta$  — наклон кривой зависимости между удельной влажностью и температурой;  $C_p$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $v_e$  — дефицит влажности воздуха;  $r_a$  — аэродинамическое сопротивление переносу водяного пара;  $v_s$  — сопротивление поверхности растительности переносу водяного пара;  $\gamma$  — психрометрическая постоянная.

Суммарное действительное испарение зависит от состояния увлажненности поверхности растительного покрова и степени покрытости почвы растительностью:

$$E_t = P_1 P_2 E_p c/s + E_a (1 - c/s) P_1 P_2 + E_{as} (1 - P_1 P_2), \quad (39.17)$$

где  $E_t$  — интенсивность суммарного испарения;  $E_a$  — интенсивность действительного суммарного испарения;  $E_p$  — потенциальное суммарное испарение;  $E_{as}$  — испарение с почвы.

Накопившаяся на поверхности почвы вода под влиянием силы тяжести стекает по склонам в русловую сеть, по которой она движется к замыкающему створу. Оба процесса описываются уравнениями нестационарного безнапорного потока, которые основаны на физических законах сохранения массы и количества движения [9].

В самом общем виде движение потока в ненасыщенной зоне может быть вычислено с помощью уравнения Ричардса

$$C = \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left( K \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \right) + \frac{\partial K}{\partial Z} + S, \quad (39.18)$$

где  $\Psi$  — напор;  $t$  — переменная времени;  $Z$  — вертикальная координата (положительное направление вверх);  $C = \partial \Theta / \partial \Psi$  — влагоемкость почвы;  $\theta$  — запас воды в почве;  $K$  — гидравлическая проводимость;  $S$  — член уравнения, выражающий соотношение наполнение/стекание.

Интенсивность инфильтрации в почву определяется условиями на верхней границе, которые могут меняться от условий, которые регулируются потоком до условий, которые регулируются почвой (насыщенной) и наоборот. Обычно нижней границей является уровень грунтовых вод.

Основным уравнением, описывающим движение воды в зоне насыщения, является нелинейное уравнение Буссинеска

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x H \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y H \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R, \quad (39.19)$$

где  $S$  — удельная водоотдача;  $h$  — уровень подземных вод;  $K_x, K_y$  — удельная гидравлическая проводимость по осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $H$  — мощность зоны насыщения;  $t$  — переменная времени;  $x, y$  — горизонтальные пространственные координаты;  $R$  — член уравнения, определяющий зависимость мгновенное пополнение/отток.

Уравнение (39.19) представляет собой комбинацию законов Дарси и сохранения массы для ламинарного двухмерного потока в анизотропном, неоднородном водоносном горизонте. Член уравнения (39.19) —  $R$ , определяющий пополнение/отток, может быть выражен в виде

$$R = \sum q - \frac{\partial}{\partial t} \int_h^{q_s} \theta(Z, t) dz, \quad (39.20)$$

где член  $\sum q$  включает:  $q_R$  — транспирация;  $q_s$  — испарение с почвы;  $q_I$  — инфильтрация;  $q_O$  — водообмен в системе река/водоносный горизонт;  $q_e$  — внешние граничные потоки;  $\theta$  — влагосодержание почвы в зоне аэрации.

Блок снеготаяния в модели ЕГС представляет собой попытку моделирования притока массы и энергии внутри снежного покрова на основании учета изменений структуры снежного покрова [12].

Два полуэмпирических уравнения используются для установления взаимосвязей, необходимых для определения распределения температуры и влагосодержания. Кроме того, эмпирические уравнения используются для определения гидравлических и термических свойств снега, определяющих его структуру, запас воды и температуру.

### 39.5        Оценка параметров

Общие методы оценки или идентификации параметров, иногда рассматриваемые в качестве способа калибровки модели, разработаны для широкого диапазона динамических систем. Опыт показал, что успех этих методов зависит от наличия адекватной информации, касающейся свойств системы и от вида функции влияния. Существуют два основных подхода к калибровке. В первом подходе математическая модель объединяется с данными, чтобы выполнить параметризацию системы при неизвестных коэффициентах. Обычно такие системы уравнений сложны в применении, так как могут иметь множественные решения и обладают неустойчивостью. Второй подход представляет собой эксперименты с различными комбинациями значений параметров с целью минимизировать (или максимизировать) некоторые принятые критерии оптимизации. Многочисленные подходы были разработаны специалистами по прикладной математике применительно к минимизации числа вычислений, необходимых для оптимизации значений параметров. Некоторые подходы, используемые в гидрологии, — следующие: градиентный метод, метод косых координат, метод поиска аналога [1, 13]. Адекватность решения может в значительной степени зависеть от критериев, используемых при анализе. Значительное число таких критериев было разработано и представлено в проектах ВМО [5, 14]. Их можно рекомендовать для общего использования.

Следующие принципы рекомендуются для определения параметров комплексных, концептуальных гидрологических моделей, состоящих из нескольких компонентов:

- a) раздельное тестирование компонентов модели с использованием всей экспериментальной и научной информации. Хорошо известен факт, что при определении всех без исключения параметров модели посредством оптимизации возможно получение нереальных значений параметров, иногда даже выходящих за пределы их физических границ. Это происходит в том случае, когда некоторые элементы модели содержат систематические ошибки, которые впоследствии компенсируются внутри модели. Для того чтобы избежать таких ситуаций, рекомендуется раздельно определять параметры комплексных концептуальных моделей для каждого основного компонента;
- b) использование для калибровки моделей данных не менее чем за трехлетний период; для верификации модели использование другого периода аналогичной продолжительности. Периоды для калибровки и верификации следует выбирать таким образом, чтобы они отражали характерные условия формирования стока, например: паводок, вызванный дождями, половодье, вызванное снеготаянием, и низкий сток;
- c) в тех случаях, когда гидрологический режим бассейна находится под влиянием антропогенных воздействий, рекомендуется калибровать модель применительно

к условиям естественного режима стока. Впоследствии значения некоторых параметров могут быть изменены для того, чтобы оценить антропогенные воздействия. Проверка параметров модели должна быть выполнена по репрезентативному периоду, не затронутому антропогенным влиянием.

Параметры гидродинамических моделей представляют собой характеристики бассейна, например: шероховатость склонов и речного русла, фильтрационную способность почвы и пористость почвы. В принципе, все эти параметры определяются по данным полевых измерений, а не посредством оптимизации.

### **39.6 Стохастическое моделирование гидрологических временных рядов**

Стохастические модели — это модели «черного ящика», параметры которых оцениваются, исходя из статистических свойств наблюденного временного ряда. Стохастические методы были впервые введены в гидрологическую практику в связи с проектированием водохранилищ. Объемы месячного или годового стока являются достаточно подробной информацией для этой цели, но при расчете регулирующей емкости водохранилища должна учитываться также вероятность наступления критических группировок лет, которая наилучшим образом может быть оценена с использованием последовательных рядов стоковых характеристик. Каждая последовательность должна охватывать многолетний период и отражать свойства генеральной совокупности, поскольку она используется для получения статистических характеристик. Устойчивость статистических свойств многолетнего ряда является основным требованием при выборе соответствующей стохастической модели. Намного труднее осуществлять одновременное моделирование стоковых рядов для двух или большего количества стоков водохранилища в бассейне реки из-за необходимости учета внутрирядных корреляционных связей [15, 16].

Стохастическое моделирование применялось также для определения доверительных границ (вероятностей) при прогнозировании стока в реальном масштабе времени и для описания рядов осадков, которые использовались в качестве входных данных в детерминированные модели [17–18]. Поскольку такие приложения крайне ограничены и скорее имеют экспериментальный характер, они в дальнейшем не рассматриваются.

#### **39.6.1 Марковские модели 1-го порядка**

Многие модели для имитации месячного, сезонного или годового объемов стока предполагают использование Марковской модели 1-го порядка, когда величина стока за любой период определяется стоком за предшествующий период и случайнym импульсом [19–23]. Одна из таких моделей для месячного стока может быть представлена следующим образом [22]:

$$Q_i = \bar{Q}_j + \rho_j \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} (Q_{i-1} - \bar{Q}_{j-1}) + \varepsilon_i \sigma_j \sqrt{1 - \rho_j^2}, \quad (39.21)$$

где  $Q_i$  — значение расхода воды  $i$ -го члена ряда, последовательно пронумерованного, начиная от 1 независимо от месяца или года;  $j$  — номер месяца, на который приходится  $i$ -ый член ряда;  $Q_j$  — средний расход за  $j$ -месяц;  $\sigma_j$  — стандартное отклонение для  $j$ -го месяца;  $\rho_j$  — коэффициент внутрирядной корреляции между  $Q_j$  и  $Q_{j-1}$ ;  $\varepsilon_i$  — случайная переменная соответствующего распределения, имеющая нулевое среднее значение, единичную вариацию и являющаяся независимо распределенной. Уравнение (39.21) может также использоваться для моделирования сезонного стока ( $j = 1, 2, 3$  и  $4$ ) и годового стока ( $j = 1$ ). В последнем случае уравнение (39.21) упрощается:

$$Q_i = \bar{Q} + \rho(Q_{i-1} - \bar{Q}) + \varepsilon_i \sqrt{1 - \rho^2}. \quad (39.22)$$

Предполагается, что  $\bar{Q}$ ,  $\sigma$  и  $\rho$ , определяемые по ряду наблюдений, удовлетворяют поставленным целям и необходим только выбор начального значения  $Q_{i-1}$  для моделирования рядов любой длины. Обычно используется метод Монте-Карло с вычислением последовательных величин случайных переменных с помощью компьютера.

В принципе разработка и применение моделей, описываемых уравнением (39.21), — задача относительно нетрудоемкая и простая. Тем не менее, существуют несколько вопросов, требующих тщательного рассмотрения и решения, которые могут стать решающими с учетом особенности изучаемой проблемы:

- a) каково распределение случайных переменных [24];
- b) следует ли корректировать дисперсию за счет корреляции, если таковая имеет место [25];
- c) с какой точностью рассчитывать величину коэффициента внутрирядной корреляции [26];

### 39.6.2 Авторегрессионные модели со скользящим средним (ARMA)

Наиболее значительное развитие в работах Бокса и Дженкинса [27–30] получили одномерные стохастические модели, относящиеся к группе ARMA-моделей. Существуют три типа таких моделей — авторегрессионная (AR), модель скользящего среднего (MA) и смешанная модель (ARMA). Первые два типа моделей (порядка  $p$  и  $q$ ) имеют соответственно вид:

$$x_t = \varepsilon_t + \Phi_1 x_{t-1} + \Phi_2 x_{t-2} + \dots + \Phi_p x_{t-p}, \quad (39.23)$$

$$x_t = \varepsilon_t - \theta_1 x_{t-1} - \dots - \theta_q x_{t-q}, \quad (39.24)$$

где  $x_t$  — отклонение  $t$ -го наблюдения от среднего значения ряда;  $\Phi_i$  и  $\theta_i$  — параметры, которые следует оценить;  $\varepsilon_t$  — случайная переменная, описанная выше.

Третий тип модели (ARMA) — это комбинация первых двух, содержащая в себе все неповторяющиеся элементы уравнений (39.23) и (39.24).

Последовательная процедура была разработана для счета по ARMA-моделям, состоящая из следующих этапов [27]:

- a) идентификация: коррелограмма исследуемых рядов сравнивается с автокорреляционной функцией различных ARMA-моделей для выбора подходящего типа и порядка модели;
- b) оценка: параметры модели оцениваются итерацией с помощью метода наименьших квадратов при условии, что отклонения распределены независимо, а сумма их квадратов минимальна;
- c) диагностическая проверка: отклонения проверяются на случайность для того, чтобы подтвердить адекватность выбранной модели.

ARMA-модели используются для того, чтобы смоделировать последовательные искусственные стоковые ряды с помощью метода Монте-Карло, описанного выше. Следует еще раз отметить, что методы стохастического моделирования должны использоваться с осторожностью и критическим рассмотрением имеющихся данных наблюдений, что весьма важно для водохозяйственного проектирования.

### 39.6.3 *Модели дробного гауссовского шума и нелинейных процессов*

Открытое Херстом [31–33] несоответствие длительных рядов наблюдений за геофизическими характеристиками Марковским стационарным процессам привело к разработке двух стохастических моделей, которые могут воспроизводить длительные группировки (низкочастотные) элементов. Первая из них — модель дробного гауссовского шума (FGN) [34–37] представляет собой самовоспроизводящийся случайный процесс, характеризуемый функцией спектральной плотности с особым упором на очень низкие частоты, типичные для эффекта Херста. Также было показано, что долгопериодные модели нелинейных процессов охраняют эффект Херста [38, 39].

Херстом найдено отсутствие необходимости подтверждения устойчивости длительных рядов [40, 41], и, кроме того, некоторые варианты ARMA-моделей способны моделировать существенно более низкочастотные эффекты [42]. Нестационарность хода среднего значения может также проявиться в характеристиках, которые Херст обнаружил при анализе длительных рядов наблюдений, независимо от того явились ли они результатом климатических изменений, человеческой деятельности или просто неоднородности рядов наблюдений.

## 39.7 *Моделирование качества воды*

### 39.7.1 *Общие положения*

Управление качеством воды в естественных и искусственных водоемах представляет собой комплексную задачу, которая требует мониторинга характеристик

качества воды, интерпретации полученных в процессе мониторинга данных в отношении влияющих факторов и прогноза будущих изменений этих характеристик применительно к различным вариантам управления. Использование моделей качества воды может оказать большую помощь в решении этой проблемы. Ниже представлены методы, которые позволяют давать такие прогнозы, основываясь на следующих данных:

- a) рядов входных данных по притоку загрязняющих веществ;
- b) начальных метеорологических условий и условий состояния окружающей среды;
- c) гидравлических и гидрологических характеристик водных объектов и их водо-сборов;
- d) изменений во времени или по территории характеристик качества водных объектов применительно к различным вариантам управления водными ресурсами. Модели качества воды часто являются взаимоувязанными с гидравлическими и гидрологическими моделями.

При управлении качеством воды модели могут быть использованы для нескольких целей, включая:

- a) создание сетей мониторинга качества воды в пространстве и во времени;
- b) интерпретацию полученных данных в отношении факторов, определяющих качество воды;
- c) интерполяция данных во времени и пространстве и оценка качества данных;
- d) взаимная увязка с моделями загрязнения других элементов окружающей среды (воздух, почва) и экологическими моделями;
- e) оценка трендов качества воды без учета и с учетом различных мер по предотвращению загрязнения;
- f) прогноз времени поступления загрязнения и профиля концентрации загрязнения вдоль потока.

### 39.7.2 Типы моделей

Модели качества воды могут быть в основном подразделены на три категории:

- a) физические модели: модели, предназначенные для воспроизведения (обычно в уменьшенном масштабе) исследуемого явления. Модели качества воды этого типа обычно ограничиваются изучением хорошо известных процессов, представляющих собой отдельные звенья в цепи таких же процессов, протекающих в естественных водных объектах или в водоочистных установках, например изменения содержания кислорода при вторичной аэрации или влияния хлорирования на определенные виды бактерий;
- b) аналоговые модели: модели, характеризующиеся использованием удобного преобразования свойств качества воды из одного вида в другой, более простой для изучения. Например, конкретные химико-биологические изменения состояния реки могут быть представлены в виде изменений свойств электрической проводимости;

- c) математические модели: модели, в которых явление исследуется посредством составления алгоритма, который представляет собой в аналитической форме связь между различными видами поступлений в водный объект, их гидравлическими и гидрологическими характеристиками и пространственно-временной изменчивостью характеристик качества воды.

В последние годы развитие математических моделей качества воды продвинулось гораздо дальше, чем два других типа моделей, главным образом благодаря вычислительным возможностям современных компьютеров. В решении текущих задач управления качеством воды используются в основном математические модели. По этой причине ниже рассматриваются только математические модели.

Математические модели также могут быть классифицированы в соответствии с:

- элементами качества воды: одно- и многоэлементные модели;
- типов моделируемого элемента: в консервативной форме (например соль), неконсервативной физической форме (например температура), неконсервативной химической форме (например растворение кислорода) или неконсервативной биологической форме (например коли-индекс бактерий);
- пространственной размерностью: одномерные, двухмерные или трехмерные модели;
- временной изменчивостью: стационарные или динамические модели;
- методом анализа: детерминированные, стохастические, смешанные модели.

Дополнительные сведения о классификации математических моделей качества воды можно найти в [43].

### 39.7.3 Модели переноса загрязнения в реках

Моделями, наиболее часто используемыми на практике для описания переноса загрязнения в реках, являются одномерные модели, основанные на адвективно-дисперсном уравнении

$$\frac{dc}{dt} + u \frac{dc}{dx} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (39.25)$$

где  $c$  — концентрация загрязнителя;  $u$  — средняя скорость течения воды;  $D$  — коэффициент продольной дисперсии;  $t$  — время;  $x$  — расстояние.

Коэффициент продольной дисперсии рассчитывается на основе уравнения Фишера

$$D_L = \frac{\sigma^2 U^3}{2L}, \quad (39.26)$$

где  $U$  — средняя скорость на участке;  $L$  и  $\sigma^2$  — дисперсия кривой концентрации.

Чтобы применять эти модели для исследования переноса загрязнения в реке, река разделяется на участки (каждый длиной в несколько километров), в пределах

которых скорость воды принимается постоянной. Эта скорость рассчитывается с использованием гидравлической или гидрологической модели (раздел 34.3).

### 39.7.4 *Применение и примеры*

Математические модели могут использоваться для различных целей, о чем в общих чертах сказано в разделе 39.7.2. Применимость математических моделей для любых целей, перечисленных в этом разделе, зависит от способности потребителя получить необходимые данные для калибровки и проверки достоверности модели, от пригодности модели для данных целей и условий, и от возможности адаптации модели к решению специфических проблем и правильной интерпретации результатов.

Модели качества воды применяются с различным успехом для решения проблем управления качеством вод во многих странах [44]. Например, относительно простая модель была использована для исследования влияния на качество воды крупномасштабных перебросок стока из р. Северн в р. Темза [45]. Модель была использована для оценки влияния такой переброски на концентрацию многочисленных консервативных и почти консервативных примесей, содержащихся в воде. Модель основана на разделении речного стока по источникам питания (поверхностный, грунтовый и подповерхностный сток) и на установленных соотношениях между концентрацией рассматриваемых определяющих факторов со стоком воды и его изменчивостью для каждого источника. Результаты моделирования показали достаточно хорошее соответствие наблюдаемым значениям.

Еще одним примером практического применения моделей качества воды для целей управления водными ресурсами является изучение влияния устранения нагрузки по БПК на водоочистных сооружениях на концентрацию растворенного кислорода в воде р. Темза, в провинции Онтарио, Канада[46]. Результаты показывают, что получаемые концентрации растворенного кислорода, превышающие критерий и соответствующие хорошему качеству воды в результате устранения нагрузки на БПК, отмечаются в одной точке, в то время как для другой точки делать такой вывод затруднительно.

Другие примеры моделей качества воды, разработанных и используемых в Соединенных Штатах Америки, приводятся Цембровичем и др. в работе *Qualitative Modelle, Arbeitskreis "Matematische Flussegebetsmodelle"* [47] (Математическая модель качества, раздел «Математическая модель водосбора») и Томаном в работе *Systems Analysis and Water Quality Management* [48](Системный анализ и управление качеством воды). Работа ВМО *Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies* [49](Гидрологические аспекты аварийного загрязнения водных объектов) дает детальный обзор некоторых моделей качества воды, применяемых в Германии, Канаде, Польше, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки и Франции для различных рек, имеющих существенные проблемы, связанные с загрязнением.

Модели качества воды также используются для расчетов распространения аварийных загрязнений. Такие модели используются применительно к р. Рейн, начиная с 1989 г. [50].

Хотя в большинстве моделей, упомянутых выше, рассматриваются, главным образом, загрязнения от индустриальных и городских сточных вод, в некоторых моделях рассматриваются также загрязнения от рассеянных источников, относящихся, например, к лесохозяйственной и сельскохозяйственной деятельности или к неканализированным сбросам. Пример модели, которая использовалась для исследования диффузионных источников по БПК, возникающих от сельскохозяйственных и неканализированных сбросов, которая одновременно моделирует поверхностный сток, наносы и БПК во всех точках речного бассейна, представлен Соломоном и др. в работе *Application of WATMAP-WATFILE Data Systems in the Development of a Distributed Water Quantity — Water Quality Model for South Nation River Basin* [51] (Применение систем данных WATMAP-WATFILE при разработке модели с распределенными параметрами количество-качество для Южного национального речного бассейна).

### 39.8 Выбор моделей

Конечно, выбор моделей не ограничивается теми из них, которые были описаны выше. Часто бывает трудно определить относительные преимущества и недостатки моделей, предложенных для оперативного использования. Выбор модели, подходящей для конкретной гидрологической ситуации, имеет значение при планировании, развитии и управлении водными ресурсами, в оперативной гидрологической деятельности и при определении направлений дальнейших исследований в области моделирования. Некоторые факторы и критерии, используемые при выборе модели, — следующие [2]:

- a) главная задача моделирования: экстраполяция прогнозируемых гидрологических элементов (детерминированное моделирование) или влияние человека на естественный гидрологический режим;
- b) вид системы, которая моделируется: малый водосбор, водоносный горизонт, участок реки, водохранилище, крупный бассейн;
- c) моделируемые гидрологические элементы: паводок, средние суточные расходы, средние месячные расходы, уровни грунтовых вод, качество вод и т. д.;
- d) тип модели и описание наиболее характерных гидрологических процессов, например:
  - i) если исследуется минимальный речной сток, то модель должна включать структуру, наиболее подходящую для моделирования грунтовых вод;
  - ii) очень важно, чтобы прогностические модели распространялись на модернизированные компоненты;
- e) климатические и физико-географические характеристики водосбора;
- f) данные, необходимые для калибровки и работы модели: их тип, период, качество;

- g) простота модели, рассматривается вопрос о том, насколько сложна гидрологическая модель и насколько легко ее применение;
- h) возможность переноса параметров модели, полученных для малых бассейнов, на большие водосборы;
- i) способность модели быть подходящим образом настроенной на основе текущих гидрометеорологических условий.

Полезную информацию и руководство по выбору и применению концептуальных моделей в различных гидрологических ситуациях можно найти в международных проектах ВМО:

- a) Взаимное сравнение концептуальных моделей, используемых при оперативном гидрологическом прогнозировании [5];
- b) Взаимное сравнение моделей стока весеннего половодья [14];
- c) Имитированное взаимное сравнение гидрологических моделей в реальном масштабе времени [52].

### Список литературы

1. Корен В. И., Кучмент Л. С. Применение метода оптимизации в построении математических моделей осадки—сток — *Метеорология и гидрология*, 1969, № 2.
2. Serban, P., 1986: *Operational Hydrological Models Used in Region VI (Europe)*. Technical report for IX-RA VI, WMO, Geneva.
3. Amoroch, J. and Brandstetter, A., 1971: Determination of non-linear functional response functions in rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, Vol. 7, pp. 1087–1101.
4. Diskin, M. H. and Simpson, E. S., 1978: A quasi-linear, spatially distributed cell model for the surface runoff system. *Water Resources Bulletin*, Vol. 14, No. 4, pp. 903–918.
5. World Meteorological Organization, 1987: *Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting*. Operational Hydrology Report No. 7, WMO-No. 429, Geneva.
6. World Meteorological Organization, 1990: *Hydrological Models for Water-Resources System Design and Operation*. Operational Hydrology Report № 34, WMO-No. 740, Geneva.
7. Burnash, R. J. C., Ferral, R. L. and McGuire, R. A., 1973: *A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modelling for Digital Computers*. National Weather Service and State of California Department of Water Resources, March.
8. Sugawara, M., Ozaki, E., Watanabe, I. and Katsuyama, S., 1974: *Tank Model and its Application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune*. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention, Science and Technology Agency, Tokyo, Japan, June.
9. Danish Hydraulic Institute, 1985: *Introduction to the SHE-European Hydrologic System*, Horsholm.

10. Rutter, A. J., Morton, A. J. and Robison, P. C., 1975: A predictive model of rainfall interception in forests. Part II: Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, Vol. 12, pp. 364–380.
11. Monteith, J. L. 1965: Evaporation and environment. In: The State and Movement of Water in Living Organisms. *Symposium of the Society for Experimental Biology*, Vol. 19, pp. 205–234.
12. Morris, E. M. and Godfrey, J. G., 1979: The European Hydrological System snow routine. In: Colbeck, S. C. and Ray, M. (eds.), *Proceedings on Modelling of Snow Cover Runoff*, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire.
13. Eagleson, P. S., Mena, R. and March, F., 1966: Computation of optimum realizable unit hydrographs. *Water Resources Research*, Vol. 2, No. 4, pp. 755–764.
14. World Meteorological Organization, 1986: *Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff*. Operational Hydrology Report No. 23, WMO-No. 646, Geneva.
15. Young, G. K. and Pisano, W. C., 1968: Operational hydrology using residuals. *Journal of the Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. HY4, Paper 6034.
16. Matalas, N. C., 1967: Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 937–945.
17. Pattison, A., 1964: *Synthesis of Rainfall Data*. Stanford University, Department of Civil Engineering, Technical Report No. 40.
18. Franz, D. D., 1969: *Hourly Rainfall Synthesis for a Network of Stations*. Stanford University, Department of Civil Engineering, Technical Report No. 126.
19. Fiering, M. B. and Jackson, B. B., 1971: Synthetic streamflows. *Water Resources Monograph Series*, Vol. 1, American Geophysical Union.
20. Beard, L., 1965: Use of interrelated records to simulate streamflow. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 91, No. HY-S.
21. Fiering, M. B., 1967: *Streamflow Synthesis*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
22. Thomas, H. A. and Fiering, M. B., 1962: Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. In: Maass, et al., *Design of Water Resources Systems*. Chapter 12, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
23. Roesner, G. and Yevjevich, V., 1966: *Mathematical Models for Time Series of Monthly Precipitation and Monthly Runoff*. Hydrology Paper, No. 15, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
24. Linsley, R. K., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H., 1975: *Hydrology for Engineers*. Second edition, McGraw-Hill, New York, pp. 378–384.

25. Burges, S. J., 1970: *Use of Stochastic Hydrology to Determine Storage Requirements for Reservoirs: A Critical Analysis*. Stanford University Programme on Engineering, Economic Planning Report EEP-34, September.
26. Anderson, R. L., 1962: Distribution of the serial correlation coefficient. *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 13, pp. 1–13.
27. Box, G. E. P. and Jenkins, G. M., 1970: *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco.
28. Clarke, R. T., 1973: *Mathematical Models in Hydrology*. Irrigation and Drainage Paper No. 19, Food and Agriculture Organization, Rome.
29. Tao, P. C. and Delleur, J. W., 1976: Seasonal and non-seasonal ARIMA models in hydrology. *Journal of the Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. HY10.
30. Hipel, K. W., McLeod, A. I. and Lennox, W. C., 1977: Advances in Box-Jenkins modelling. Part I: Model construction. *Water Resources Research*, Vol. 13, pp. 567–575.
31. Hurst, H. E., 1951: Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol. 116, pp. 770.
32. Hurst, H. E., 1956: Methods of using long-term storage in reservoirs. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 5, No. 5, pp. 519–590.
33. Hurst, H. E., Black, R. P. and Simaika, V. M., 1965: *Long-term Storage*. Constable, London.
34. Mandelbrot, B. B. and Wallis, J. R., 1968: Noah, Joseph, and operational hydrology. *Water Resources Research*, Vol. 4, No. 5, pp. 909–918.
35. Mandelbrot, B. B. and Wallis, J. R., 1969: Computer experiments with fractional gaussian noises. *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 1, pp. 228–267.
36. Mandelbrot, B. B. and Wallis, J. R., 1969: Some long-run properties of geophysical records. *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 321–340.
37. Mandelbrot, B. B., 1971: A fast fractional gaussian noise generator. *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 543–553.
38. Rodriguez-Iturbe, I., Mejia, J. M. and Dawdy, D. R., 1972: Streamflow simulation, (1) A new look at Markovian models, fractional gaussian noise, and crossing theory. *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 921–930.
39. Mejia, J. M., Rodriguez-Iturbe, I. and Dawdy, D. R., 1972: Streamflow simulation, (2) The broken line process as a potential model for hydrologic simulation. *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 931–941.
40. Klemes, V., 1974: The hurst phenomenon: a puzzle? *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 4, pp. 675–688.
41. Lettenmaier, D. P. and Burges, S. J., 1978: Climate change: detection and its impact on hydrologic design. *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 4, pp. 679–687.

42. O'Connell, P. E., 1971: A simple stochastic modelling of Hurst's law. *Proceedings of the International Symposium on Mathematical Models in Hydrology*, 26–31 July 1941, Warsaw, IAHS Publication No. 100, pp. 169–187.
43. Grimsrud, G. P., Finnemore, E. J. and Owen, H. J., 1976: *Evaluation of Water Quality Models, A Management Guide for Planners*. Publication EPA 600/5-76-004, Washington, D.C.
44. Biswas, A. K. (ed.), 1981: *Models for Water Quality Management*. McGraw-Hill, New York.
45. Water Planning Unit, 1977: *River Quality Modelling Studies, Severn to Thames Water Transfer Scheme*. Annual Report 1976/77.
46. Ontario Ministries of the Environment and of Natural Resources, 1975: *Water Management Study, Thames River Basin*. Toronto, Ontario.
47. Cembrovicz, R. G., et al., 1975: Studie über bestehende Flussgebietsmodelle. Teil B: *Qualitative Modelle, Arbeitskreis "Mathematische Flussgebietsmodelle"*. Ministry of the Interior, Bonn, Federal Republic of Germany.
48. Thoman, R. V., 1972: *Systems Analysis and Water Quality Management*. McGraw-Hill, New York.
49. World Meteorological Organization, 1991: *Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies*. Operational Hydrology Report No. 37, WMO-No. 754, Geneva.
50. Broer, G. J. A. A, 1991: Alarm system for accidental pollution on the river Rhine. *Proceedings of the Symposium on Hydrology for the Water Management of Large River Basins*, 13–15 August 1991, Vienna, IAHS Publication No. 201.
51. Solomon, S. I., et al., 1976: *Application of WATMAP-WATFILE Data Systems in the Development of a Distributed Water Quantity-Water Quality Model for South Nation River Basin*. Report for Environment Canada.
52. World Meteorological Organization, 1991: *Simulated Real-time Intercomparison of Hydrological Models*. Operational Hydrology Report No. 38, WMO-No. 779, Geneva.

## ГЛАВА 40

### ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

#### 40.1       **Общие положения**

Положения, рассмотренные в этой главе, касаются двух совершенно различных физико-географических особенностей — местоположения изучаемого объекта и влияния этих особенностей на характер атмосферных явлений. Посредством типизации этих особенностей можно не только составить их каталог, но также определить их пространственное распространение и климатические зоны, к которым они принадлежат.

Эти особенности могут найти отражение в виде точечных контуров, линий, площадей или объемов, характеризующих определенную взаимосвязь между отдельной характеристикой и гидрологическим режимом. Например, речной сток является результатом преобразования климатических явлений (дождь, снеготаяние) физическим комплексом водосборного бассейна. Местоположение бассейна отчасти определяет те климатические особенности, которые вызывают вышеуказанные метеорологические явления. Однако физические характеристики бассейнов не только управляют гидрологической реакцией бассейна на метеорологические явления, но и некоторые из них, такие, как орография или вид растительности, могут в свою очередь определять климатические особенности бассейна.

#### 40.2       **Системы координат**

Интересующие физико-географические характеристики могут быть «привязаны» пространственно посредством использования международной системы координат — меридианов и параллелей, разделяющих земной шар в широтном и меридиональном направлениях на  $360^{\circ}$ , с нулевым меридианом, проходящим через Гринвич. Эта система имеет наиболее широкое применение. Ее единственное неудобство состоит в том, что расстояние, соответствующее одному радиусу по долготе, изменяется от 111,111 км на экваторе до 0 на полюсе и составляет 78,567 км на широте  $45^{\circ}$  (одному градусу широты соответствует расстояние в 111,111 км). Местные системы координат и другие виды проекций также используются, например система Ламберта, которая до сих пор широко применяется во Франции. Однако такие системы не могут быть рекомендованы в международном руководстве.

Третья координата — высота, которая определяется относительно заданного уровня или плоскости. Несмотря на то что иногда используются местные уровни отсчета, средний уровень моря — наиболее часто используемый уровень отсчета.

Основные элементы, используемые при определении физико-географических параметров, редко измеряются гидрологами непосредственно, они, как правило, работают с картами, аэрофотосъемкой и, с недавнего времени, со спутниковыми изображениями. Следовательно, точность оценок зависит от точности каждого вида используемого базового источника [1].

#### 40.3 Измерения в точке

Геометрическая точка определена здесь как единственное местоположение на линии либо внутри площади, либо объема. Точка может быть физическим элементом, таким, как местоположение измерительного прибора или замыкающий створ бассейна. Она может также быть элементом площади (участка земли), в котором данная характеристика или набор характеристик должны быть определены или измерены. Физико-географические характеристики, относящиеся к точке могут быть простыми или сложными (составными). Примером простой характеристики точки на карте является ее высота — одна из уникальных координат в трехмерном пространстве. Более сложной характеристикой может быть описание почвенного профиля с основанием в точке.

Применение дистанционных методов, начавшееся с аэрофотосъемки, привело к эффекту расширения понятия точки до области, которая может достигать нескольких км<sup>2</sup>. Пределы точности в этом случае таковы, что применяемые методы могут не позволить сделать различие между двумя точками (например вследствие недостаточной разрешающей способности оборудования), и в качестве точки может быть взят элемент изображения.

Горизонтальное местоположение точки, т. е. ее расположение на глобусе определяется выбранной системой координат (раздел 40.2), которая является предметом рассмотрения геодезии и топографии. Универсальная система была изобретена для того, чтобы закодировать точку в каталоге, указав ее географическое положение. Это квадратичная система GEOREP [2]. Другие системы могут определять положение точек по линейным расстояниям до них вдоль потока заданного начала (например: устья, места слияния рек).

Физико-географическое описание точки включает в себя характеристики ее геометрических свойств (форма, рельеф, уклон и т. д.) и ее постоянных физических свойств (проницаемость, характер горной породы, структура почвы, тип землепользования и проч.). Первые ограничены из-за конкретного положения точки на склоне, тогда как вторые включают в себя целый ряд возможных физических свойств, выраженных в скалярной форме для точки на горизонтальной поверхности или в векторной форме для профиля (например геологическое ядро).

#### 40.4        **Проблемы линейности**

Любые физико-географические элементы линейны, если они могут быть представлены линией на карте или в пространстве. В гидрологии наиболее часто используются три вида линейных элементов:

- a) границы;
- b) изолинии постоянных характеристик (например контуры),
- c) тальвеги.

Первые два вида связаны с пространственными описаниями, которые будут рассмотрены позже.

Тальвег рассматривается не только самостоятельно, представленный в горизонтальной проекции и на долготном профиле, но также в комбинации с другими тальвегами, формируя речную сеть, которая имеет свои собственные физико-географические характеристики. Некоторые характеристики речной сети линейны, например разветвленность русла (биfurкационное отношение), в то время как другие — густота сети — имеют пространственный характер.

##### 40.4.1      **Водоток**

Водоток в горизонтальной проекции при соответствующем масштабе может быть представлен двумя линиями, представляющими его берега. Основываясь на этих двух линиях, ось может быть проведена как равноудаленная от двух берегов. Ось может быть также определена как линия, соединяющая низшие точки последовательных поперечных сечений. Фактически эти элементы — видимые берега и низшие точки — не всегда явно выражены, и масштаб карты не всегда позволяет отразить характерные свойства берегов. Карттирование в этом случае сводится к представлению водотока в виде линии.

Расстояния вдоль реки измеряются по линии реки на карте с использованием курвиметра. Точность определения зависит от масштаба карты и ее качества так же, как и от ошибки курвиметра, которая не должна превышать 6 % при расстоянии на карте в 10 см, или 4 % для 100 см и 2 % при большем расстоянии.

Ось водотока редко бывает прямой. Когда она представлена квазипериодическими изгибами, каждый полупериод называется меандром. Свойства и размеры меандров были основательно изучены географами и специалистами в области речной гидравлики [3].

##### 40.4.2      **Речная сеть**

В пределах бассейна водотоки формируют речную сеть. Речная сеть представлена водотоками разного размера. Для их классификации было предложено несколько систем. Наиболее известна классификация Хортона, в которой каждый элементарный водоток рассматривается как водоток первого порядка, любой водоток с

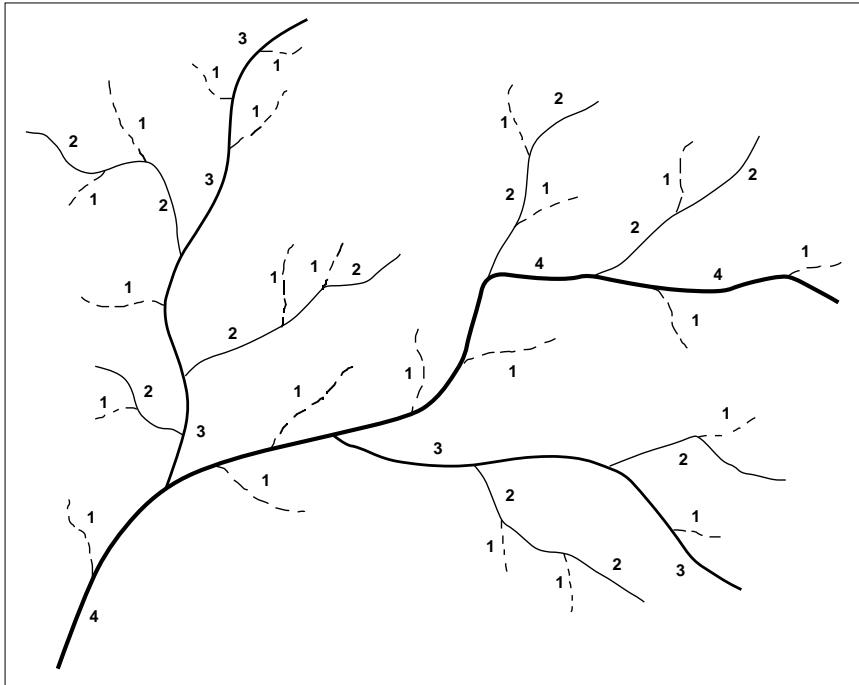


Рисунок 40.1 — Классификация Хортона

притоком первого порядка — как водоток второго порядка и любой водоток с притоком порядка  $x$  рассматривается как водоток порядка  $x + 1$ . При слиянии рек любые сомнения снимаются, если придать высший порядок наиболее длинному водотоку (рисунок 40.1) [1]. Это создавало некоторую неопределенность, которая была устранена Шуммом путем систематического присвоения порядка  $x$  водотокам, сформированным двумя водотоками порядка  $x - 1$  (рисунок 40.2). Главный источник ошибки при такой оценке связан с картированием водотоков, когда определение самых малых водотоков бывает часто достаточно субъективным.

Линейные характеристики речной сети, которые могут быть измерены по карте, коэффициент слияния —  $R_c$  и коэффициент длины —  $R_p$ , основываются на законах Хортонса и были подтверждены классификацией Хортонса. Если обозначить  $N_x$  как номер водотоков порядка  $x$ , и  $lm_x = \Sigma l_x / N_x$  — это средняя длина водотоков порядка  $x$ , тогда эти законы выражаются следующими соотношениями:

$$N_x = R_c * N_{x+1} \quad (40.1)$$

и

$$lm_x = R_p * lm_{x-1}, \quad (40.2)$$

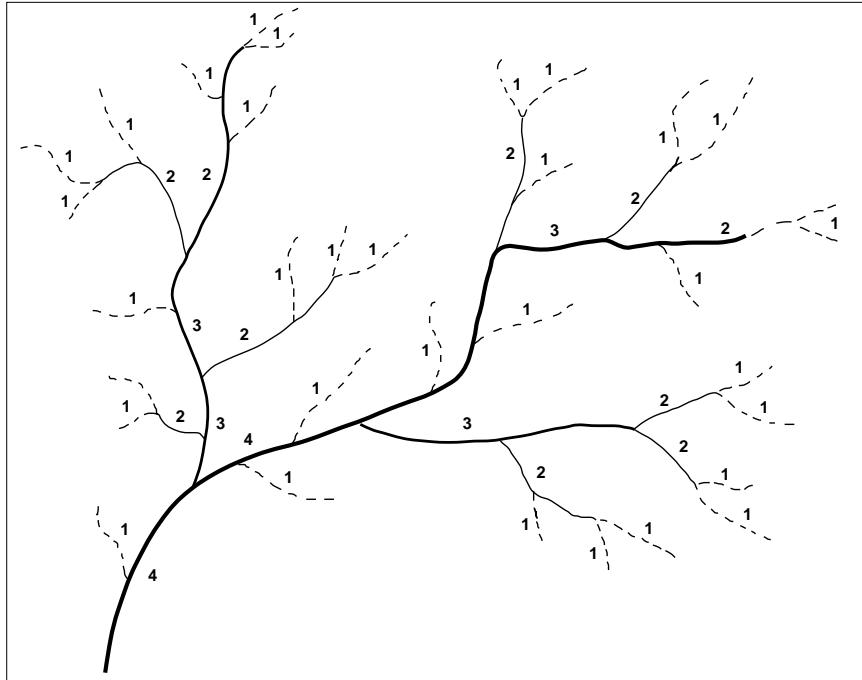


Рисунок 40.2 — Классификация Шумма

которые образуют геометрическую прогрессию и могут быть записаны:

$$N_x = N_1 \cdot R_{cl-x} \quad (40.3)$$

и

$$lm_x = lm_1 \cdot R_{lx-1}, \quad (40.4)$$

где  $R_c$  и  $R_l$  вычислены как уклоны прямых линий, приведенных к графическим точкам ( $\log N_x$ ,  $x$ ) и ( $\log lm_x$ ,  $x$ ).

#### 40.4.3 Профиль водотока

Профиль водотока — это изменение высотных отметок отдельных точек его тальвега как функции расстояния от условного начала, за которое обычно принимается место слияния с более крупным водотоком или устье водотока. На таком профиле следует определить ряд топографических характеристик, таких как, высокие отметки точек (пороги), понижения между двумя порогами (плесы), быстрина, водопады и изменения уклона, которые обычно приурочены к границе между двумя участками реки с различным геологическим строением (рисунок 40.3).

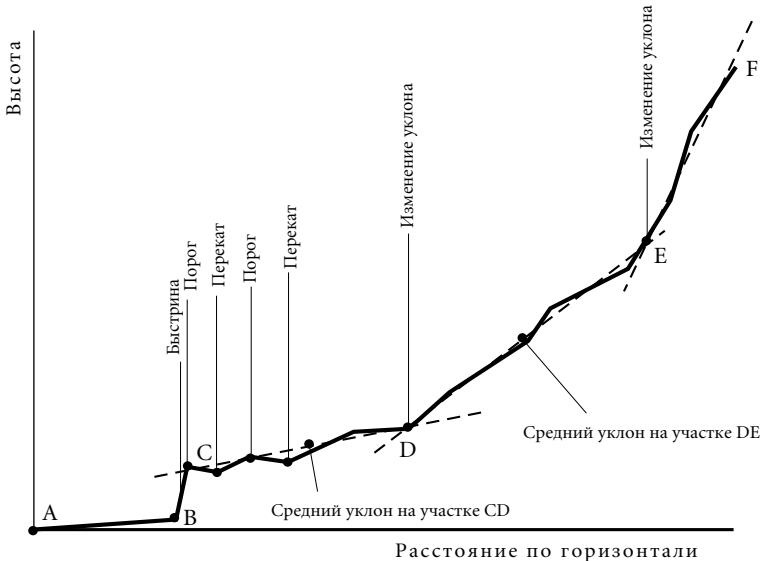


Рисунок 40.3 — Профиль водотока

Средний уклон всего водотока есть разность высотных отметок его высшей точки и точки слияния или устья, разделенная на общую длину водотока. Это понятие является простым, но не очень используемым. С другой стороны, сведения об уклонах последовательных участков водотока необходимы для большинства стоковых и гидравлических моделей.

#### 40.4.4 Речная сеть

Профили главного водотока и различных притоков в одном и том же бассейне могут быть представлены на одной и той же диаграмме. На рисунке 40.4 в качестве примера показаны профили реки Нигер в Коулекоро и ее главных и второстепенных притоков. Такая диаграмма дает обобщенное представление об изменении уклонов элементов речной сети.

#### 40.4.5 Поперечное сечение

Профиль долины, перпендикулярной оси потока, называется поперечным сечением. Набор поперечных сечений представляет собой ценную информацию при разработке моделей речного стока. Поперечные сечения используют при некоторых видах расчетов, и способ их установления может зависеть от того, где они будут применяться.

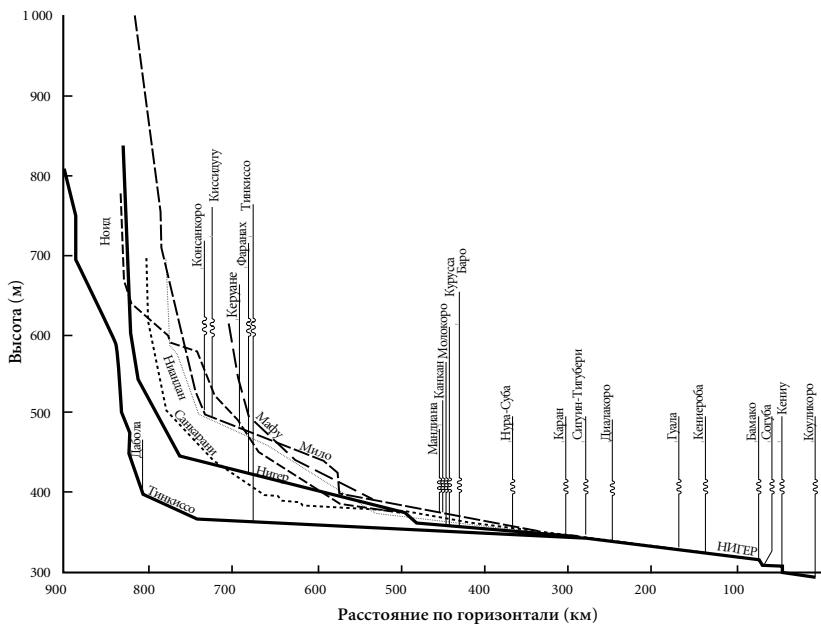


Рисунок 40.4 — Профиль р. Нигер и ее притоков

Особенно важным случаем является вычисление стока при измерении расхода воды, когда высотные отметки выражаются через глубину и определяются посредством промеров (раздел 11.2.2). Поперечные сечения обычно получают, выполняя обычные топографические измерения в период самой низкой водности.

#### 40.4.6 *Физические характеристики*

Тип материала, слагающего русло (особенно его способность к сцеплению), вид и количественные показатели наличия растительности в водотоке, а также шероховатость дна, которая зависит от продольного и поперечного распределения донных отложений — основные физические характеристики водотока. Показатель шероховатости включается в расчетные зависимости при расчете стока косвенным способом (раздел 11.6) и моделировании стока (глава 34).

#### 40.5 *Измерения площадей*

##### 40.5.1 *Бассейн*

Бассейн определяется как площадь, которая получает осадки, и после гидрологических процессов, заключающихся в потерях и задержаниях воды, преобразует их

в замыкающем створе. Граница водосбора или периметр бассейна определяются, исходя из того, что любые осадки, выпавшие внутри этих границ, движутся по направлению к замыкающему створу, тогда как любые осадки, выпавшие вне этих границ, дренируются другим бассейном и замыкающим створом. В некоторых случаях границы бассейна не могут быть легко определены, например когда начало главного водотока формируется в плоской низменной долине или болотистой местности. Границы водораздела обычно определяются с помощью топографических карт или аэрофотосъемки.

Периметр бассейна измеряется с помощью курвиметра. Измеренный периметр есть функция масштаба и точности карт или фотоизображений, качества курвиметра и тщательности, с которой окончательное значение должно определяться той точностью, в которой выполняются измерения. В некоторых случаях линии, обводящие контур водосбора следует сглаживать перед измерением периметра (рисунок 40.5).

Площадь бассейна измеряется планиметром посредством обвода границ бассейна, установленных описанным выше способом.



Рисунок 40.5 — Сглаживание границ водосбора

Ирезанность бассейна характеризуется отношением его периметра к длине окружности круга, площадь которого соответствует площади бассейна. Если обозначить буквой  $A$  площадь бассейна и буквой  $P$  его периметр, измеренные в соответствии с указанными выше правилами и выраженные в сопоставимых единицах, тогда отношение двух периметров будет характеризоваться коэффициентом Гравелиуса (сжатости), который определяется по формуле

$$C = 0,282 P A^{1/2}. \quad (40.5)$$

Представление об эквивалентом прямоугольнике [1] также связано с изрезанностью бассейна и позволяет определять особый склоновый индекс. Эквивалентный прямоугольник имеет такую же площадь и такой же коэффициент Гравелиуса, как и бассейн. Длина этого прямоугольника выражается следующим уравнением:

$$L = A^{1/2} \frac{C}{1,128} \left[ 1 + \sqrt{1 - 1,272/C^2} \right]. \quad (40.6)$$

Густота речной сети определяется как суммарная длина водотоков всех порядков, находящихся в пределах единичной площади бассейна:

$$D_d = (\sum L_x)/A, \quad (40.7)$$

где  $L_x$  — суммарная длина водотоков порядка  $x$ . Обычно на практике длина водотоков выражается в км, а площадь в  $\text{км}^2$ .

Рельеф бассейна, показанный на картах с помощью горизонталей, может быть описан с помощью гипсометрического распределения или гипсометрической кривой. Рисунок 40.6 показывает изображение рельефа в двух смежных бассейнах, диапазоны высот показаны различной штриховкой.

Гипсометрическое распределение показывает, какую часть в процентах (или в долях) составляет площадь каждой из высотных зон в общей площади бассейна. Гипсометрическая кривая показывает на оси ординат процент площади бассейна, которая располагается на или выше соответствующей высотной отметки, указанной на оси абсцисс (рисунок 40.7). На практике обобщенное распределение площадей получается с помощью последовательного планиметрирования отдельных площадей, расположенных между горизонталами, начиная с самой низшей точки бассейна.

Можно рассчитать среднюю высоту бассейна посредством деления площади гипсометрической кривой на длину ординаты, соответствующей всему бассейну.

Уклон бассейна может быть представлен несколькими индексами. Наиболее старый и, вероятно, до сих пор наиболее широко используемый индекс — средний уклон бассейна  $S_m$ . Он определяется с помощью горизонталей по формуле

$$S_m = z * \sum 1/A, \quad (40.8)$$

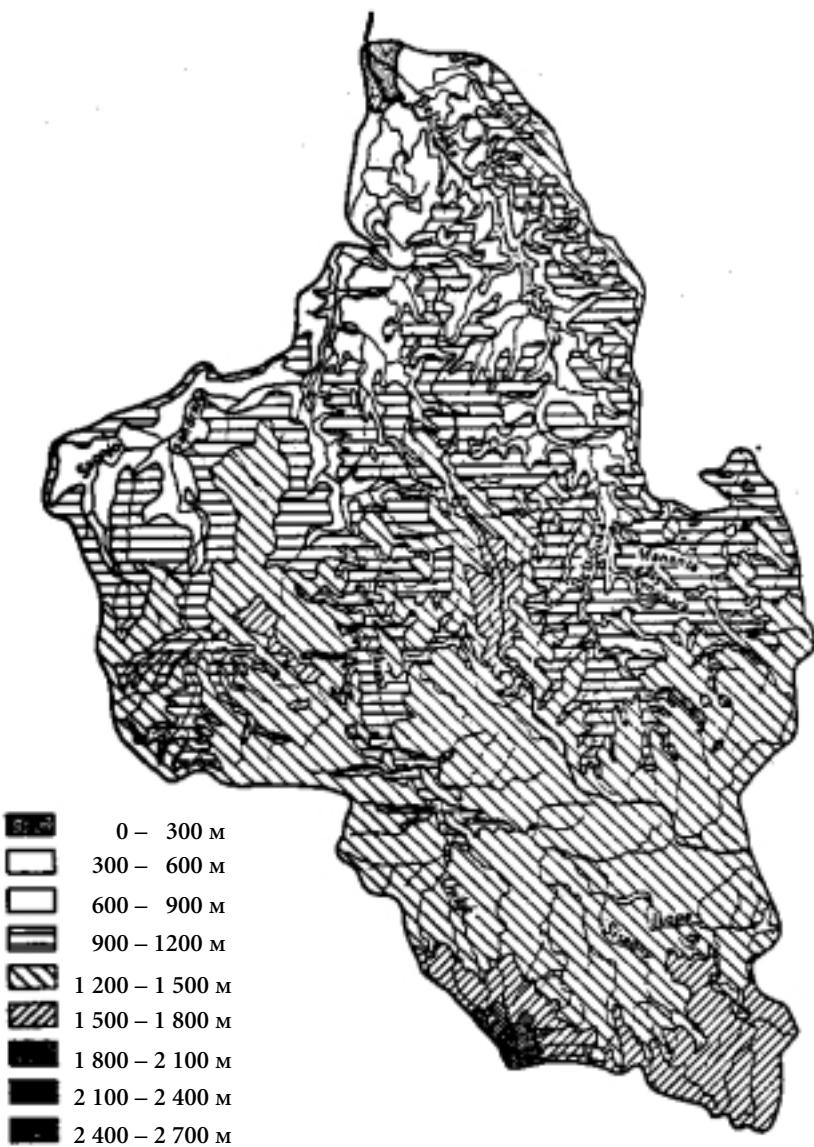


Рисунок 40.6 — Рельеф и речная сеть

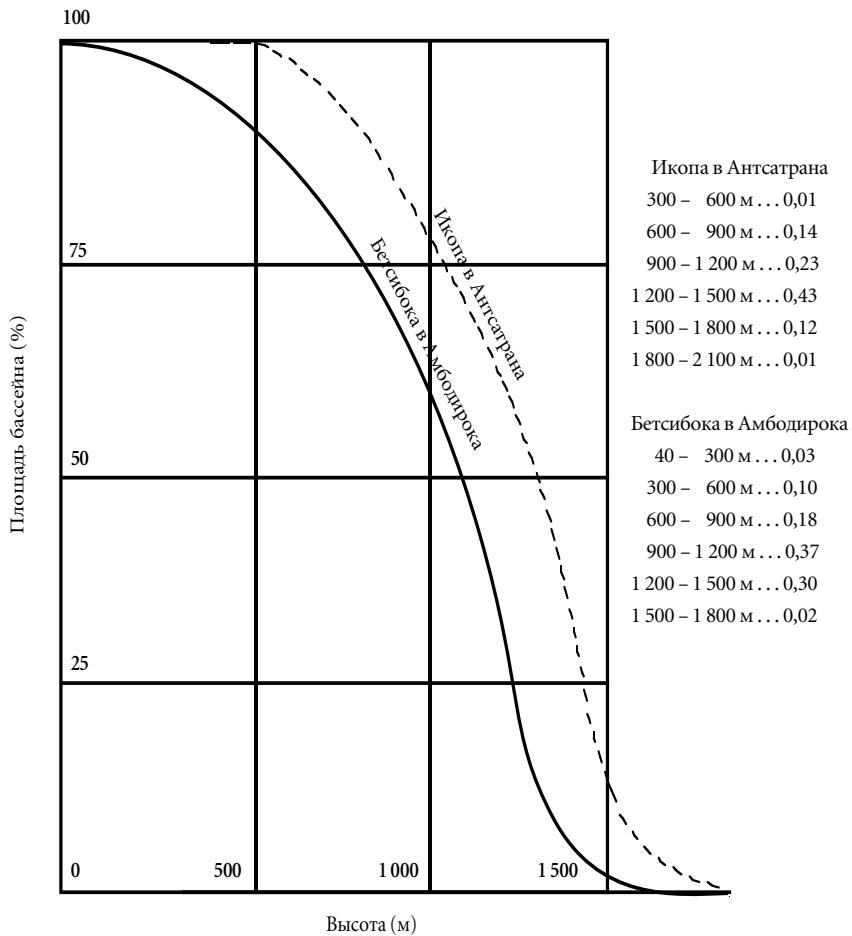
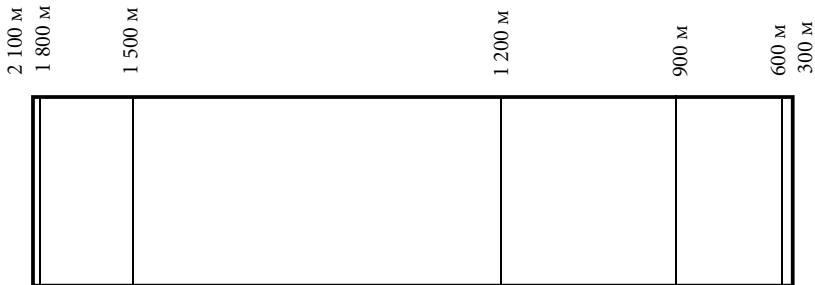


Рисунок 40.7 — Гипсометрические кривые

где  $z$  — расстояние между горизонталиями;  $\Sigma l$  — общая длина всех горизонталей в пределах бассейна;  $A$  — площадь бассейна. Трудности и главный источник ошибки при определении этой характеристики связаны с измерением  $\Sigma l$ . Горизонтали почти всегда сильно извилисты, и их истинная длина не является реальной характеристикой той роли, которую они играют при вычислении индекса. Поэтому необходимо сглаживать неровности, но это намного более рискованно, чем при вычислении периметра бассейна. Следовательно, окончательные результаты могут быть, до некоторой степени, неустойчивы и изменчивы.

## Икопа в Ансатрана



## Бетсибока в Амбодирока

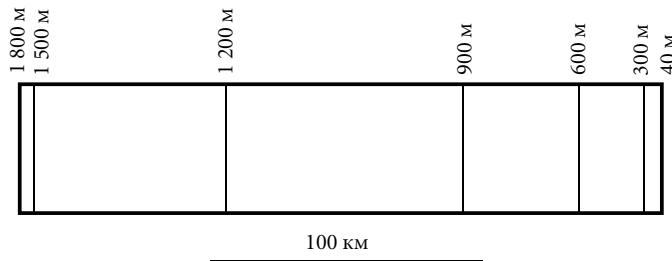


Рисунок 40.8 — Эквивалентные прямоугольники

Среднее значение уклона может быть также оценено путем деления общей разности высотных отметок бассейна на один из его характерных размеров. Однако при оценке распределения уклонов в бассейне этим способом пренебрегают. Единственный способ избежать этого — получить индекс уклона по гипсометрической кривой, которая дает обобщенное представление о рельефе, очерченном горизонтальными, и «весе» отдельных площадей, соответствующих различным высотным интервалам с помощью нелинейной функции среднего уклона в каждом интервале. Индекс уклона Роше, также названный индексом стоковой чувствительности, удовлетворяет этим условиям. Понятие эквивалентного прямоугольника (уравнение 40.6) используется для каждого контура, чтобы преобразовать геометрические горизонтали в параллельные прямые линии на прямоугольнике, представляющем бассейн в целом (рисунок 40.8). Если  $a_i$  и  $a_{i-1}$  — высотные отметки двух смежных горизонталей,  $x_i$  — расстояние между ними на эквивалентном прямоугольнике, то среднее значение уклона между этими двумя горизонтальными берется равным  $(a_i - a_{i-1}) / x_i$ , и индекс уклона записывается как  $\tilde{n}_i$  доли общей площади бассейна, заключенной между  $a_i$  и  $a_{i-1}$ .

$$I_{\pi} = \sum (\tilde{n}_i(a_i - a_{i-1}) / L)^{1/2}. \quad (40.9)$$

В таблице, представленной ниже, дается индекс уклона Роше.

### Индекс уклона Роше

<i>Бассейн</i>	<i>Длина эквивалентного прямоугольника</i>	<i>Индекс уклона</i>
Бетсибока в Амбодирока	238 км	0,078
Икопа в Бевоманга	278 км	0,069

Физические характеристики бассейна это, по существу, — типы почв, естественный или искусственный растительный покров, посевы и тип использования земли (например: сельские или городские территории, озера или болота). Они также могут быть выражены в показателях реакции бассейна на осадки (например классы проницаемости).

Для количественного выражения этих характеристик необходимо определение критериев и процедур для очерчивания площадей, соответствующих этим критериям. Тогда остается только измерить каждую из этих площадей и выразить в процентах или долях единицы. Средствами для определения таких распределений являются обычная и/или специальная картография, аэрофотосъемка и дистанционные средства измерений со сравнительно хорошим разрешением (элементы изображения не превышают нескольких сотен квадратных километров).

#### 40.5.2 Координатная сетка

Создание банков физико-географических данных, особенно для развития моделей осадки—сток с пространственной дискретизацией, вызывает необходимость разделения площади бассейна, основываясь на сетке квадратов или координатной сетке. В зависимости от цели размер сетки может быть больше или меньше, может измеряться в км (один или пять квадратных километров) или основываться на международной географической системе ( $1'$  или  $1^{\circ}$  сетки). Географические информационные системы (раздел 40.7) сделали обмен данными, представленными в двух видах (на координатной сетке и в произвольной форме), простой задачей при наличии однажды созданной базы данных.

#### 40.6 Измерения объема

Измерения объемов связаны, главным образом, с определением запасов воды и насосов. Оценка запасов подземных вод является предметом гидрогеологии. Поэтому данный вопрос здесь не рассматривается так же, как и вопрос об оценке объема

наносов, отложившихся на поверхность почвы. Запасы воды на поверхности бассейна — это в основном объемы существующих озер или водохранилищ, для расчета которых используются батиметрические методы или объемы проектируемых водохранилищ, для расчета которых используются топографические методы.

#### 40.6.1 *Батиметрические методы*

Обычные карты редко содержат батиметрические данные озер и водохранилищ. Объем существующего водохранилища поэтому должен быть измерен с помощью специальных батиметрических съемок. Обычно они проводятся с судна с использованием обычных методов измерения глубин и определения местоположения судна. Глубина должна быть отнесена к определенной дате, уровню по уровнеметру или лимнографу так, чтобы изменения уровня могли быть отслежены.

Измерения глубин могут использоваться для проведения изобат, и объем водохранилища над заданной плоскостью может быть подсчитан с помощью двойного интегрирования (в основном графического) изобат. Одно из применений этого метода — мониторинг залиния водохранилища.

#### 40.6.2 *Топографические методы*

Поскольку положение плотины является фиксированным, расчеты эффективности регулирования стока водохранилищем и управления его режимом требуют наличия кривой объемов как функции уровня воды в водохранилище (кривая уровень—объем). Для определения этого отношения необходимо иметь высотные контуры земной поверхности в пределах всей площади будущего затопления. Для этого требуются карты или топографические планы указанной площади в масштабе от 1 : 1 000 до 1 : 5 000. Если такая возможность отсутствует, карты в масштабе 1 : 50 000 могут быть использованы на стадии предварительного проектирования, однако топографическая съемка в надлежащем масштабе будет впоследствии необходима.

Используя карту контуров, планируются площади также в пределах каждого контура для района будущего водохранилища. График связи этих площадей с соответствующими высотными отметками известен как кривая уровень—площадь. Кривая уровень—объем рассчитывается на основании кривой уровень—площадь путем графического интегрирования.

### 40.7 *Географические информационные системы*

Географические информационные системы (ГИС) находят широкое применение в области оперативной гидрологии и оценки водных ресурсов. Многие проблемы сбора и интерпретации данных могут быть легко разрешены посредством использования ГИС на микрокомпьютерах при планировании или проектировании сетей.

Возможность ГИС картировать быстро и наглядно демонстрировать поверхностные водные объемы и соответствующие пункты наблюдений позволяет получать более обобщенное представление. Карты сети, показывающие бассейны или станции, выбранные в соответствии с качеством записей для определенного водосбора или по определенным характеристикам, могут быть использованы как для краткосрочного, так и долгосрочного планирования. Характерные черты комплексных сетей с помощью ГИС могут быть представлены очень наглядно.

Методы ГИС используются в гидрологических моделях с целью выбора и формирования распределенных по водосбору данных. В будущем такие методы смогут явиться эффективным соединительным звеном между атмосферными (модели глобальной циркуляции) и гидрологическими моделями. Используемое в соединении с цифровыми территориальными базами данных полное физико-географическое и гидрологическое изображение бассейнов может представлять собой наиболее готовый законченный блок для вышеуказанных моделей.

Картирование стока и его интерполяции с помощью ГИС выполняются в нескольких странах. Преимущество обработки больших объемов данных с помощью ГИС означает, что могут быть подготовлены более всеобъемлющие и детальные карты-схемы изолиний и тематические разделы. Это является значительным улучшением в практике оценки водных ресурсов, так как подготовка карт часто более трудоемка и дорога.

Интерпретация данных, полученных в реальном масштабе времени, также может быть улучшена через системы ГИС. Тематическое картирование станций, результаты наблюдений по которым выше пороговых величин или цифровых значений осадков, очевидно должно быть очень полезным как в оперативной гидрологии, так и для агентств, занимающихся прогнозированием.

Системы ГИС, имеющиеся сегодня для обычных микрокомпьютеров, доступны и имеют невысокую стоимость. Основные расходы связаны с формированием базы данных, обучением и повышением квалификации технического персонала.

### Список литературы

1. Dubreuil P., 1966: Les caractéristiques physiques et morphologiques des bassins versants: leur détermination avec une précision acceptable. *Cahiers d'hydrologie de l'ORSTOM*, No. 5.
2. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1974: The GEOREP grid station identification system. In: *Discharges of Selected Rivers of the World*, Vol. III, Part II, period 1969–1972.
3. Quesnel, B., 1963–1964: *Traité d'hydraulique fluviale appliquée*. Eyrolles, Paris.



# ЧАСТЬ Е

## ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

### ГЛАВА 41

#### ВВЕДЕНИЕ В ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

##### 41.1       **Общие положения**

Гидрологический прогноз — это оценка будущих состояний гидрологического явления. Потребность в таких прогнозах возрастает с развитием экономики государства и использованием его водных ресурсов, что подразумевает наиболее квалифицированное управление водохозяйственной деятельностью. Вместе с тем, гидрологические прогнозы необходимы для смягчения последствий стихийных бедствий, таких, как наводнения или засухи, при любом уровне развития государства. Цель этой части *Руководства* — дать информацию о типах прогнозов и предупреждений, которые выпускаются (раздел 41.2); службах прогнозов, которые обеспечивают их выпуск (раздел 41.4); требованиях к данным для гидрологического прогнозирования (глава 42); методах, используемых при прогнозировании (глава 43); а также предоставить информацию о стоимости и использовании гидрологических прогнозов (главы 44, 45 и 46).

##### 41.2       **Характеристики прогнозов**

Гидрологические прогнозы и предупреждения выпускаются для многих целей, начиная от предсказаний кратковременных событий, подобных мгновенному паводку, до оценок потенциальных сезонных водных запасов для целей орошения, энергетики или судоходства по внутренним водным путям. Для прогнозирования используются различные методы от простых эмпирических формул и корреляционных связей до сложных математических моделей, представляющих все фазы водного баланса речного бассейна.

Основное отличие гидрологических прогнозов от статистических расчетов, в которых гидролог оценивает только ожидаемую вероятность наступления явления, заключается в том, что в первом случае расчет значений отдельных элементов гидрологического режима осуществляется на точно определенный срок в будущем.

Гидрологические процессы формируются под воздействием метеорологических факторов, однако изменения, которые эти факторы вносят в гидрологический режим, проявляются немедленно. Например, продолжительность стока, вызванного выпадением осадков, часто во много раз превышает длительность их выпадения. Существует определенное запаздывание между ростом температуры

воздуха, вызывающим таяние снега и последующим повышением уровня воды в реке. Относительно медленное развитие во времени гидрологических процессов и тот факт, что они отстают от более быстрых метеорологических процессов, дают возможность предсказывать некоторые элементы гидрологического цикла.

Основные факторы, определяющие сток и другие гидрологические процессы, могут быть разделены на следующие группы:

- a) начальные факторы, которые определяют условия, сложившиеся в момент выпуска прогноза, и которые могут быть вычислены или оценены на основе текущих гидрологических или метеорологических наблюдений или измерений;
- b) будущие факторы, которые обусловливают гидрологические процессы после выпуска прогноза. Наиболее важные из будущих природных факторов, а именно будущие погодные условия, могут быть надежно учтены только при наличии прогноза погоды.

Однако до сих пор не разработаны надежные методы количественного прогнозирования условий погоды с большой заблаговременностью. Поэтому практические возможности увеличения заблаговременности гидрологических прогнозов зависят от вида метеорологических прогнозов (т. е. кратко-, средне- и долгосрочные) и от степени влияния погодных условий на прогнозируемое явление.

Учитывая это ограничение, основополагающими факторами, влияющими на точность и оправдываемость гидрологических прогнозов, являются точность и надежность гидрологических и метеорологических начальных условий, скорость, с которой они могут быть собраны в центре прогнозов, адекватность используемой для прогноза модели и размер речного бассейна.

Тем не менее, гидрологические прогнозы могут составляться за периоды, выходящие за пределы надежных прогнозов погоды, если они выпускаются обобщенными на вероятные условия погоды или если использован вероятностный подход для оценки этих условий. Такие обобщенные или вероятностные прогнозы весьма обычны при прогнозе сезонных запасов воды.

Основными гидрологическими элементами, прогнозирование которых представляет практический интерес, являются:

- a) объем стока за различные периоды времени (например: периоды высокого и низкого стока, месяц, сезон, год);
- b) график хода расходов или уровней воды во времени;
- c) максимальный уровень и расход паводка и время их наступления;
- d) максимальный уровень воды в озерах и дата его наступления;
- e) среднее и минимальное значения уровня воды судоходных рек и озер за различные календарные периоды;
- f) высота ветровых волн на озерах и больших водохранилищах;

- g) ветровой нагон на озерах, в прибрежных водах и эстуариях;
- h) характеристики качества воды, такие, как температура и мутность.

Основными элементами ледового режима рек, озер и водохранилищ, прогнозирование которых представляет практический интерес, являются (главы 45 и 46):

- a) дата начала образования льда осенью;
- b) дата замерзания;
- c) толщина ледяного покрова;
- d) дата вскрытия весной;
- e) дата полного очищения от льда озер и водохранилищ.

Могут потребоваться также прогнозы следующих элементов режима подземных вод и почвенной влаги:

- a) минимальный уровень водоносного горизонта и месяц его наступления;
- b) максимальный или прогнозируемый уровень водоносного горизонта;
- c) дата прекращения весеннего стока;
- d) дата наступления полевой влагоемкости.

Ниже приводятся определения стандартных терминов, используемых для идентификации различных гидрологических прогнозов:

- a) краткосрочный гидрологический прогноз: прогноз будущего значения гидрологического элемента на период не более двух дней после выпуска прогноза;
- b) среднесрочный (расширенный) гидрологический прогноз: прогноз будущего значения гидрологического элемента на период от двух до десяти дней после выпуска прогноза;
- c) долгосрочный гидрологический прогноз: прогноз будущего значения гидрологического элемента на период более 10 дней после выпуска прогноза;
- d) сезонный гидрологический прогноз: прогноз будущего значения гидрологического элемента на сезон (обычно охватывающий период в несколько месяцев и более);
- e) гидрологическое предупреждение: экстренная информация об ожидаемом гидрологическом явлении, представляющем опасность.

Гидрологические прогнозы имеют шесть основных характеристик:

- a) переменная прогноза, являющаяся предсказываемым гидрологическим элементом;
- b) заблаговременность прогноза, известная также как период прогноза или период предупреждения;
- c) используемые расчетные методы;
- d) целевое назначение прогноза;
- e) форма представления прогноза, например: одно ожидаемое значение, суммарный гидрограф, вероятностное распределение прогнозируемой величины;
- f) способы распространения прогноза.

### 41.3 Эффективность гидрологических прогнозов

Гидрологические прогнозы представляют ценность для рационального регулирования стока, энергии рек, работы водного транспорта, ирригации и (особенно в засушливых районах) водоснабжения и управления качеством воды. Прогнозы также чрезвычайно важны для борьбы с опасными явлениями на реках. В результате заблаговременного предупреждения о наводнении могут быть предприняты необходимые шаги для предотвращения гибели людей и материальных ценностей, чтобы нарушения нормальной жизнедеятельности и разрушения, вызванные этими природными бедствиями, могли быть сведены к минимуму.

Гидрологические прогнозы также важны при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений. Например, надежные методы прогнозирования сезонного стока и максимальных расходов воды могут быть использованы при проектировании плотин и водосливов, что обеспечит более экономичное строительство и эффективную эксплуатацию сооружений.

#### 41.3.1 Точность и своевременность прогнозов

Ценность гидрологических прогнозов зависит в большой мере от их точности. Требования, предъявляемые к точности прогноза, должны соответствовать назначению прогноза. Однако точность должна рассматриваться вместе со своевременностью прогноза. Критерием при оценке качества прогноза должно быть идеальное соответствие его как по точности, так и своевременности. Точность и своевременность прогнозов зависят от надежности и объема гидрологической и метеорологической информации, скорости, с которой эта информация поступит в центр прогнозов, от времени реакции речного бассейна, вида метода или модели прогноза, которые используются, времени, необходимого для доведения прогноза до потребителей.

Ошибки измерения, ограничения модели и природная изменчивость метеорологических данных, являющихся входными параметрами в гидрологические системы, являются причинами неопределенности в гидрологическом прогнозировании. Существуют следующие методы устранения неопределенности:

- a) оценка точности гидрологических приборов;
- b) количественное описание природной изменчивости метеорологических данных либо с помощью вероятностного распределения, либо в виде стохастических процессов;
- c) эмпирическая оценка точности гидрологических моделей путем сопоставления полученных результатов с данными наблюдений.

Основываясь на этих методах, прогнозист должен оценить общую ошибку прогноза и довести эту информацию до потребителя. Однако основное преимущество такой процедуры оценки для самого прогнозиста — выявление возможности усовершенствования прогноза. Оценка вероятности прогнозов также

полезна для отдельных потребителей для оценки рисков, связанных с решениями, которые могут ими приниматься в ответ на прогноз. Количественные прогнозы осадков (КПО) поддаются прогнозированию в вероятностной форме.

Неопределенность будущих условий, особенно в отношении выпадения осадков, является основным источником неопределенности в гидрологическом прогнозировании. Разрабатываемые новые методы имеют целью максимальное использование данных всех возможных источников, т. е. радиолокаторов, спутников, данных метеорологических наблюдений и прогнозов и данных наземных измерений.

#### **41.3.2        *Издержки и экономическая эффективность гидрологических прогнозов***

Определение экономической эффективности и затрат при использовании прогнозов осуществляется аналогично оценке затрат и эффективности при планировании и проектировании объектов. Факторами, которые учитываются при таких оценках, являются:

- a) уровень, до которого может быть снижен ущерб в типичных бытовых, промышленных, коммерческих и сельскохозяйственных ситуациях при предсказании наводнения;
- b) уровень, до которого данный прогноз может быть эффективным в отношении оперативных аспектов ведения сельского хозяйства, промышленности или коммерческой деятельности, по сравнению с другими видами гидрологических прогнозов;
- c) определение общей эффективности в отношении всего региона. Она должна включать как материальные, так и нематериальные источники.

Дополнительному рассмотрению при прогнозировании подлежит эффект влияния неточностей прогнозов на реакцию и доверие потребителя в течение длительного периода времени. При сравнении альтернативных стратегий прогнозирования должен быть рассмотрен эффект относительных преимуществ во времени.

Такие оценки сами по себе представляют собой обширное поле деятельности, и поскольку гидрологическое прогнозирование является относительно дешевым, то в редких случаях стоимость прогноза превышает его эффективность. Квалифицированные гидрологи и экономисты, участвующие в проектных работах, должны рассматривать возможную экономическую эффективность прогноза для различных областей деятельности, таких, как промышленность и сельское хозяйство. Особенно это касается энергетических проектов с совмещенными тепловыми и гидроэлектрическими станциями, когда гидрологические прогнозы должны применяться для определения относительных пропорций использования указанных типов станций для любых промежутков времени. Ввиду сложности проблемы, любое решение при

исследовании экономической эффективности в системе гидрологического прогнозирования еще до начала исследования должно быть предметом тщательного изучения. Если принимается решение предпринять такое исследование, тогда оценка денежной прибыли от службы прогнозирования наводнений может быть выполнена с использованием следующих графических связей:

- связь между уровнем воды и причиняемым ущербом (рисунок 41.1);
- кривая распределения вероятностных уровней (рисунок 41.2);
- связь между суммарным экономическим эффектом и вероятностью события (рисунок 41.3).

Аналогичные диаграммы могут быть составлены для других типов гидрологических прогнозов. Такой подход можно использовать применительно к отдельному населенному пункту, данному участку реки или всему району действия службы прогнозов.

Связи между уровнем и ущербом для отдельных хозяйств коммерческих ферм или любых других видов землепользования в пойме реки комбинируются с информацией об их количестве, типе и высотном расположении, для того чтобы составить кривые, показанные на рисунке 41.1. Заметим, что эффективность рассчитывается по разности между социальными и экономическими последствиями обычного использования поймы без учета прогноза или с использованием элементарного общего предупреждения и последствиями при условии выпуска

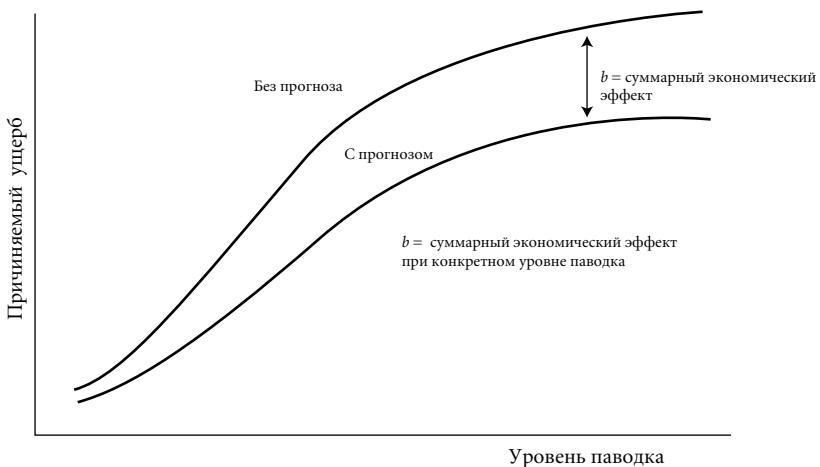


Рисунок 41.1 — Связь между уровнем воды и причиняемым ущербом

прогноза. Экономическая эффективность прогнозирования обычно ниже, чем эффективность мероприятий по защите от паводков. Однако расходы, связанные с содержанием службы прогнозов наводнений, также значительно ниже.

Можно обобщить результаты использования кривых уровень—ущерб, основанных на типичных сочетаниях различных типов хозяйственной деятельности. Аналогично могут быть использованы усредненные факторы, отражающие заблаговременность прогноза и предпринимаемые ответные меры. Методика, которая была применена в Великобритании, выражает долю сбереженных средств в процентах от общей стоимости имущества на каждый час заблаговременности прогноза. Опыт показал, что, до определенного предела, эта доля увеличивается линейно с заблаговременностью прогноза.

Вторая стадия — получение кривой распределения вероятностных уровней (рисунок 41.2). К ее определению обычно подходит через кривые повторяемости паводков (раздел 36.1.1). Дополнительные затруднения могут быть связаны с более частыми наводнениями по сравнению с обычно принятыми в практике проектирования, когда возможно уменьшение тех паводков, которые происходят два или более раз в год. Необходимо соблюдать осторожность со статистическими определениями в этих случаях. Средний паводок в рядах годовых максимумов превышается в среднем в 50 годах из 100, но на основе усеченных рядов можно получить более частое появление паводков с периодом повторяемости менее чем раз в два года (около 1,6–2,8 лет).

Трудности в проведении оценки неявной эффективности, особенно связанной с возможностью сохранения жизни, обычно мешают ее учету, хотя это важный элемент с точки зрения оправдываемости прогнозной схемы.

Экономическая эффективность, которая должна быть сопоставлена с затратами на эксплуатацию и содержание службы прогноза паводков, может быть представлена в виде ожидаемых годовых денежных величин. Если гидрологические прогнозы выпускаются на основе данных и возможностей других служб, тогда относительные затраты должны быть разделены пропорционально.

Необходимо учитывать три главных фактора затрат:

- a) затраты на содержание персонала оперативной гидрологической службы прогнозов, которые могут быть оценены путем сравнения с аналогичными существующими системами;
- b) затраты на поддержку метеорологической службы прогнозов, которые, вероятно, могут быть оценены только субъективно как реальный процент от всех затрат на содержание всей метеорологической службы в целом;
- c) затраты на содержание сети данных в оперативном режиме, которая, несмотря на возможное использование этой сети как части стандартной сети, должна быть полностью оценена применительно к целям прогнозирования, а ее альтернативное использование должно рассматриваться как нематериальная выгода.

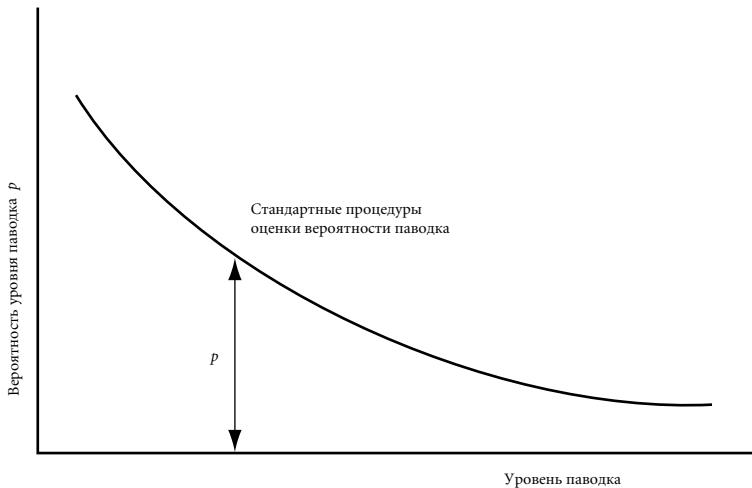


Рисунок 41.2 — Кривая распределения вероятностных уровней



Рисунок 41.3 — Связь между суммарным экономическим эффектом и вероятностью события

Важным аспектом оправдываемости гидрологических систем прогнозирования является тот факт, что назначаемые экономические оценки, связанные с сохранением человеческой жизни и предотвращением страданий, обычно не могут быть обоснованы. Существующие методики, основанные на данных страхования или стоимости жизни трудоспособного человека были подвергнуты критике, но, тем не менее, они должны приниматься во внимание с целью обоснования потребностей в гидрологических прогнозах.

Расчет изменений, которые могут произойти в зависимости между затратами и экономической эффективностью, может быть необходимым в случае значительного совершенствования существующих систем прогноза наводнений. Если связь затраты — экономическая эффективность для существующих систем является удовлетворительной, необходимо только рассмотреть возросшие затраты и получаемую эффективность.

Однако необходимо подчеркнуть, что существование эффективной службы предупреждения может способствовать дополнительному размещению сотрудников службы в паводкоопасных районах, что может вызвать рост затрат на содержание службы.

#### 41.4 Служба гидрологического прогнозирования

##### 41.4.1 Организация

Организация службы гидрологического прогнозирования — это внутреннее дело каждой страны. Организационная структура таких служб в разных странах может быть существенно различной. Поэтому в настоящем *Руководстве* речь может идти лишь о преимуществах определенных организационных структур, которые, как показал опыт, способствуют более эффективной деятельности этой службы, в *Руководстве* также рассматривается ряд общих проблем.

Главными условиями эффективной деятельности являются:

- a) соответствующая сеть гидрологических и метеорологических станций;
- b) возможность быстрой и надежной связи для сбора и распространения гидрологической и метеорологической информации;
- c) наличие хорошо документированных данных гидрологических и метеорологических наблюдений на технических носителях с возможностью обработки, хранения и быстрой выдачи;
- d) наличие хорошо обученного персонала в различных областях гидрологического прогнозирования;
- e) наличие сведений об эксплуатации водохозяйственных объектов и противопаводковых сооружений, таких, как водохранилища, ГЭС, ирригационные и осушительные системы.

Особое внимание должно уделяться гарантии надежности работы службы прогнозов в экстремальных условиях во время наводнений, ливней и ураганов, когда

линии связи, передачи данных, а также энергоснабжение могут выйти из строя. Персонал центра прогнозов должен быть способен спокойно выполнять свои обязанности именно в таких экстремальных ситуациях. Чтобы надежно обеспечить работу в такие периоды, должны быть предусмотрены некоторые резервные или дублирующие системы, такие, как линии радиосвязи, источники энергопитания и продовольствие для обеспечения персонала центра прогнозов.

Эксплуатация водохозяйственных систем, таких, как водохранилища, ирригационные и осушительные системы, водозaborы, водноэнергетические установки, оказывает воздействие на естественный режим речного стока. Поэтому центры гидрологических прогнозов должны располагать информацией о диспетчерских графиках работы водохранилищ, фактических водозaborах и сбросах воды, состоянии противопаводковых плотин, искусственных изменениях русел рек и т. д. Это означает, что центр гидрологических прогнозов должен тесно взаимодействовать с работниками водохозяйственных организаций с целью обмена соответствующей оперативной информацией.

Весьма желательно также, чтобы гидрологи-прогнозисты работали в тесном контакте с метеорологами, чтобы иметь непосредственный доступ к данным их наблюдений, прогнозам и советам. Этого можно достичь либо путем объединения служб, либо, если службы разделены, установлением соответствующих форм административной и оперативной связи.

В странах с большой территорией или с различными физико-географическими или климатическими условиями служба гидрологических прогнозов не может эффективно выполнять свои функции при наличии только одного центра. В дополнение к главному центру, в котором должна быть сосредоточена научно-исследовательская и методологическая работа, целесообразно иметь ряд региональных центров прогнозирования. При выделении регионов под такие центры целесообразно придерживаться границ бассейнов главных рек. При выборе мест для расположения прогностического центра основное внимание должно быть уделено возможностям сбора, обработки и распространения гидрологической информации.

#### 41.4.2 *Деятельность*

Существуют пять основных направлений деятельности прогностического центра:

- a) сбор и обработка поступающей гидрологической информации о состоянии водных объектов, эксплуатации водохозяйственных систем, а также данных метеорологических наблюдений и прогнозов;
- b) выпуск периодических бюллетеней с обзором текущей обстановки и текущими прогнозами и предупреждениями;
- c) распространение текущей информации, анализов, прогнозов и предупреждений среди заинтересованных потребителей;

- d) оценка точности прогноза и его эффективности;
- e) анализ потребностей и последующее совершенствование существующих систем прогноза.

Под пунктом (e) подразумевается, что система гидрологического прогнозирования должна постоянно находиться в состоянии развития и расширения. Расширение использования водных ресурсов и земель, особенно рост городов, — все это приводит к возникновению новых требований к гидрологической информации, повышению надежности и заблаговременности прогнозов, к удовлетворению которых службы прогнозов должны стремиться.

#### 41.5 Распространение прогнозов и предупреждений

Способ распространения информации о состоянии рек, озер, водохранилищ, а также гидрологических обзоров, прогнозов и предупреждений зависит от требований потребителей, степени срочности, имеющихся каналов связи, и тех средств, которыми располагают службы гидрологических прогнозов.

Ежедневный гидрологический бюллетень, весьма полезный в качестве источника основной информации для большинства потребителей, заинтересованных в информации о метеорологических условиях по большим территориям, включает сведения, приведенные ниже:

- a) гидро-синоптическая карта бассейна, показывающая в цифрах уровни, расходы и температуру воды рек, озер, водохранилищ, включая реальный объем воды, содержащейся в водохранилищах. Эти данные должны относиться к конкретному периоду времени. Следует использовать символы для отображения ледовых условий, заштрихованные зоны для обозначения участков с падением и подъемом уровней воды в реке и другие изображения гидрологических характеристик. В качестве альтернативы можно составить таблицу, содержащую все вышеуказанные данные, применительно к наблюдательным станциям;
- b) краткий обзор состояния водных объектов и тенденций изменения их режима в ближайшем будущем;
- c) средне- и долгосрочные гидрологические прогнозы.

Кроме ежедневных бюллетеней, может быть полезен выпуск еженедельных, десятидневных и ежемесячных бюллетеней, содержащих краткий обзор гидрологического режима в течение соответствующих периодов. В них следует поместить необходимые иллюстрации и данные, включая средне- и долгосрочные прогнозы, с заблаговременностью в неделю, 10 дней или месяц. Часть информации, содержащейся в бюллетенях, может быть распространена среди населения по каналам радио, телевидения и прессы.

В дополнение к бюллетеням некоторые потребители будут нуждаться в более точной информации и прогнозах. Вопросы содержания форматов, времени

обслуживания и каналов передачи специализированной информации должны быть согласованы службой гидрологического прогнозирования с заинтересованными потребителями. С увеличением временного разрешения данных для рек со временем стояния максимального расхода менее 24-х часов, вполне оправдан выпуск более частых прогнозов.

Все вышеуказанные методы распространения информации, которые могут иметь место в нормальных гидрологических условиях, основаны на установленном порядке действий. Другая группа методов применяется в экстремальных условиях, например: при наводнениях, засухах или других бедствиях, представляющих опасность. В каждой стране обычно создается одна ответственная организация для координации действий в случае бедствия. Эта организация становится наиболее важным потребителем гидрологической информации в чрезвычайных условиях, и особенно важно, чтобы все детали, касающиеся передачи информации этому потребителю были согласованы заранее.

Обычно информация в чрезвычайных условиях передается потребителям более часто, например каждый час или два часа, вместо обычной передачи раз в 24 часа. Кроме того, информация для районов, затронутых бедствием, отличается особой спецификой. Предупреждения о мгновенных паводках представляют собой особый случай, когда наиболее важным требованием является передача информации непосредственно потребителям в кратчайшие сроки (раздел 41.3.2). Обработанная информация в форме бюллетеней, анализов, прогнозов и предупреждений распределяется центральным или региональными центрами гидрологического прогнозирования. Некоторые дополнительные данные могут быть переданы заинтересованным потребителям непосредственно наблюдателями на станции. Однако обязательно, чтобы аварийные службы обеспечивались отдельным и ясным набором графиков с их оригиналами и добросовестно, четко зарегистрированными в бюллетене.

Хотя существуют различные способы составления гидрологических прогнозов, невозможно обеспечить безошибочный прогноз, несмотря на то что некоторые потребители его ожидают. Ожидание такого прогноза иногда создает непонимание между прогнозистом и потребителем. Чтобы избежать этого, потребитель должен быть информирован о надежности прогноза, о котором идет речь, с помощью критерии, которые описаны в разделе 41.3.2. Приведенные в нем графики можно рассчитать до выдачи прогноза и уточнить их после каждого выпуска прогноза, что должно позволить улучшить прогнозирование. Опыт показал, что существование ошибок и понятие доверительного интервала трудны для понимания тех потребителей, которые не знакомы с методами прогнозирования.

## ГЛАВА 42

### ТРЕБОВАНИЯ К ДАННЫМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫМ В ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗАХ

#### 42.1       **Общие положения**

Данные, использующиеся в гидрологических прогнозах, можно разделить на две группы, первая из которых включает в себя все материалы, необходимые для разработки метода прогнозирования (раздел 42.2), а вторая — информацию, необходимую для выпуска прогноза (раздел 42.3). К первой группе относятся соответствующие гидрологические и метеорологические временные ряды, которые необходимы для проверки и совершенствования испытываемых моделей. Она также включает в себя физико-географическую информацию (например: площади водосборов, виды землепользования, почвенные характеристики, размеры русла, уклоны склонов), необходимую для описания тех водосборов, по которым намечается давать прогнозы. Вторая группа включает в себя гидрометеорологические данные, определяемые прогнозной схемой и предназначенные для того, чтобы охарактеризовать состояние водосбора как можно более точно непосредственно перед выпуском прогноза. Она также может включать в себя результаты измерений отдельных переменных, которые могут использоваться для слежения за реализацией прогноза или совершенствования модели прогноза путем использования метода оптимизации с учетом обратных связей (раздел 43.10). Надежность прогноза может быть напрямую связана с количеством и пространственным распределением имеющихся данных и их взаимосвязанностью. Здесь необходима тщательность, чтобы обеспечить независимость данных, используемых для разработки метода прогноза и данных, используемых при выпуске прогноза. Именно поэтому взаимосвязанность рядов данных так же, как и объем этих данных, весьма важна.

Требования к данным существенно зависят от используемого метода прогноза, прогнозируемого периода и гидрологических характеристик бассейна. На деле объем имеющихся данных может наложить ограничения на выбор методов прогнозирования. Тем не менее, шаги по совершенствованию сети всегда должны предприниматься в целях максимального учета требований, предъявляемых к данным.

#### 42.2       **Данные, используемые для разработки метода прогноза**

Достаточно развитая сеть наблюдений и соответствующее оборудование, необходимые для изучения речной системы и ее картирования являются предпосылками

для разработки гидрологических прогнозов. На начальной стадии могут разрабатываться альтернативные методы прогноза, а анализ гидрологических событий будет ретроспективным. Таким образом, на стадии разработки метода прогноза обычно требуется большее количество данных наблюдений, чем это будет необходимо в дальнейшем. Тем не менее еще на стадии разработки метода прогноза, очень важно иметь в виду его конечные цели, с тем чтобы предусмотреть правильную установку осадкомеров и достаточную частоту измерений.

В последующих разделах описываются различные виды данных, которые являются неотъемлемыми элементами процесса разработки прогноза.

#### **42.2.1 Гидрологические переменные**

На стадии разработки прогноза вид гидрологического анализа, который предпринимается, описан во многих примерах в части D настоящего Руководства, где определены зависимости между входными и выходными переменными, например снеготаяние как функция градусо-дней (глава 31) или очертание единичного гидрографа (раздел 33.3.1) в зависимости от площади распространения дождя и стока с бассейна. Требования, предъявляемые к сети и приборам, также рассматриваются в соответствующих разделах.

Следует отметить различия в требованиях к данным при разных способах прогнозирования, например, в отношении метода градусо-дней и теплобалансового подхода при прогнозировании снеготаяния и в отношении метода единичного гидрографа и концептуальных моделей в случае прогноза стока. Возможное повышение точности прогноза должно быть сопоставимо с теми затратами, которые потребуются для получения входных данных в последующей фазе выпуска прогноза.

#### **42.2.2 Характеристики водосборов**

Соответствующие обзоры состояния речных водосборов могут давать их детальные описания или, если это невозможно, освещать их основные гидрологические свойства. Примерами таких обзоров могут служить описания почв или геологических свойств водосбора, которые определяют закономерности стока или топографические съемки, которые служат основой для снегомерных маршрутов при определении бассейнов главных притоков, а также помогают построению моделей с распределенными параметрами. Вероятно, что на стадии разработки прогноза простые взаимосвязи должны быть установлены между измеряемыми элементами, например: между высотой снежного покрова и слоем осадков в ограниченном числе пунктов наблюдений и общим количеством осадков на всей площади водосбора. Для этих целей существенную помощь могут оказать аэрофотосъемки и спутниковые съемки (разделы 7.7 и 8.6).

### 42.2.3 *Характеристики рек*

Многие гидрологические модели включают в себя расчеты русового и озерного регулирования (глава 34). Там, где эти расчеты основаны на принципах гидравлики, должны быть известны физические характеристики речного русла. Поперечные и продольные сечения, а также данные о запасах воды нужны для точного выбора контрольных створов в пределах главных водных объектов.

### 42.3 *Данные, необходимые для выпуска прогноза*

После того как метод прогноза определен, состав данных наблюдений на сети, которые были использованы на стадии разработки прогноза, может, вероятно, быть уменьшен до тех элементов, которые требуются для выпуска прогноза. Существуют многочисленные альтернативные сети для получения тех данных, состав которых зависит от взаимосвязи между используемым методом прогноза и типом речного бассейна.

Для краткосрочных прогнозов уровня воды в реке или толщины льда могут измеряться следующие переменные:

- уровень в верхнем течении реки и объем воды;
- временное и пространственное распределение осадков и снегозапасов;
- характеристики грунта, включая влажность почвы и ледяную корку;
- нарастание ледяного покрова и степень покрытия;
- метеорологические данные для расчета теплового баланса.

Для краткосрочных прогнозов чрезвычайно важно, чтобы все данные наблюдений незамедлительно поступали в центр прогнозов.

Для долгосрочных прогнозов будут требоваться данные измерений с более удаленных частей крупных водосборов, такие, как крупномасштабные характеристики атмосферной циркуляции. Прогнозы количества осадков и температуры воздуха также могут потребоваться. В то же время некоторые измерения, характеризующие кратковременные изменения, могут быть опущены. В последующих разделах описаны наиболее часто требующиеся входные переменные.

#### 42.3.1 *Осадки*

Минимальная рекомендуемая плотность осадкомерной сети приведена в разделе 20.2.1.1. В то время как вышеуказанная плотность и, возможно, более высокая плотность для водосборов площадью менее 2 500 км<sup>2</sup> являются подходящими для разработки прогнозов, логика может подсказать, что при выпуске краткосрочных и среднесрочных прогнозов допустима более низкая плотность. Данные радиолокаторов и спутников могут быть весьма полезны в таких условиях (раздел 42.6.2). Для прогнозирования паводков на всех бассейнах, за исключением самых крупных, на ряде участков необходимо установить дистанционные осадкомеры.

#### 42.3.2 *Снег*

Сеть измерений характеристик снежного покрова должна иметь плотность, достаточную для обеспечения надежной оценки запасов воды в снеге. Для краткосрочного прогнозирования необходимы частые наблюдения, тогда как при долгосрочном прогнозировании могут быть достаточными еженедельные или ежемесячные наблюдения. В горной местности наблюдения за характеристиками снежного покрова выполняются с помощью снегомерных съемок и суммарных осадкомеров (раздел 7.5).

Площадь распространения снежного покрова может быть оценена с некоторым успехом на основе точечных наблюдений, несмотря на возрастающие возможности дистанционных методов (раздел 42.6.2), позволяющие лучше решить эту проблему.

Измерения температуры воздуха также требуются для реализации моделей прогноза снеготаяния.

#### 42.3.3 *Уровни воды и речной сток*

Несмотря на то что требования к основному оборудованию и выбору мест для измерения уровней и расходов воды в целях прогнозирования являются аналогичными обычным, общепринятым в гидрометрии (главы 10 и 11), следует, тем не менее, учитывать местоположение участка реки, его доступность и возможности передачи данных в центр прогнозов.

При прогнозе паводков часто необходим компромисс между увеличением заглавовременности предупреждения и уменьшением точности прогнозов. Этот компромисс зависит от того, как далеко вверх по течению расположены осадкомеры от точки прогнозирования. Лицо, выпускающее предупреждение о наводнении, должно ориентироваться на максимальное использование прогноза и надлежащее проектирование сети и размещение осадкомеров для получения такого типа сигнала тревоги, который ожидается. Например, при перекрестной корреляции (раздел 43.4) устраняется необходимость в зависимостях между уровнем и расходом на постах, регистрирующих измерения уровней воды.

При использовании некоторых недавно созданных методик прогноза, требуются измерения в створах прогнозирования для уточнения параметров модели и корректировки прогноза (раздел 43.10). Однако, невзирая на используемую модель прогноза, желателен постоянный контроль за оправдываемостью прогноза.

#### 42.3.4 *Другие требования к данным*

Использование моделей руслового регулирования увеличило потребности в информации о физических характеристиках речных русел. Помимо данных о поперечном и продольном профилях русла, которые требуются при калибровке модели, должны быть также известны изменения, происходящие

во время выпуска прогноза, и должны быть сделаны соответствующие уточнения. Следует также учитывать значимые изменения в землепользовании и вносить соответствующие уточнения в размещение пунктов наблюдательной сети.

Чтобы дать прогноз последствий разрушения плотины, информация о типе разрушения может быть использована для усовершенствования прогноза распространения паводочной волны вниз по течению реки.

#### **42.4 Использование метеорологических прогнозов**

Прогноз определенных метеорологических явлений часто используется как основа для краткосрочных прогнозов стока талых вод, дождевых паводков и разрушения ледяного покрова. Гидрологи-прогнозисты в этом случае должны иметь дело со следующими прогнозами:

- a) количественный прогноз осадков (КПО) за периоды, не превышающие 72-х часов;
- b) прогнозы температуры и влажности воздуха, точки росы, характеристик ветра, условий облачности за периоды, не превышающие 5 дней;
- c) высота границы замерзания в горных районах;
- d) скорость и направление ветра за 24 часа или за более продолжительный период.

Надежность метеорологических прогнозов быстро снижается в зависимости от прогнозируемого периода. Обычно прогноз температуры воздуха более надежен, чем прогноз осадков или ветра. Прогноз количества осадков менее надежен, чем прогноз их выпадения. Возможности использования метеорологических прогнозов важно рассматривать на начальной стадии гидрологического прогнозирования, когда принимаются решения о характере метеорологической прогнозной информации, которая может быть вовлечена в схему гидрологического прогноза [3].

#### **42.5 Точность наблюдений и частота измерений**

Рекомендуемые градации точности и частоты измерений отдельных элементов, применительно к гидрологическому прогнозированию, приведены ниже в таблице. Элементы, рассматриваемые в качестве наблюдаемых с помощью автоматических станций, также указаны в этой таблице. Осадки, уровень (или расход воды) и запас воды в снежном покрове представляют собой элементы, наиболее часто используемые в центрах прогнозов основного назначения.

#### **42.6 Получение оперативных данных**

##### **42.6.1 Сети**

Многие виды гидрологических прогнозов составляются на основе данных, полученных от сетей. Информация может включать как данные измерений, так и сведения об эксплуатации водохозяйственных объектов и противопаводковых мероприятиях. В системе прогнозирования данные основной сети (раздел 20.1.3)

**Желаемая точность наблюдений и частота измерений для целей гидрологического прогнозирования**

Элемент наблюдений	Точность наблюдений <sup>1</sup>	Частота наблюдений	Измерения с помощью автоматических наземных станций
Осадки — общая сумма и вид <sup>2</sup>	± 2 мм ниже 40 мм ± 5 % выше 40 мм	6 часов <sup>3</sup>	да
Уровень воды в реке <sup>4</sup>	± 0,01 м	6 часов <sup>5</sup>	да
Уровень воды в озере	± 0,01 м	ежедневно	да
Влажность почвы	± 10 % полевой влагоемкости	раз в неделю	да
Глубина промерзания	± 2 см ниже 10 см ± 20 % выше 10 см	ежедневно	да
Запас воды в снеге на почве	± 2 мм ниже 20 мм ± 10 % выше 20 мм	ежедневно	да
Высота снежного покрова	± 2 см ниже 20 см ± 10 % выше 20 см	ежедневно	да
Плотность снежного покрова	± 10 %	ежедневно	—
Температура воды <sup>6</sup> (рек и озер)	±0,1 °C в диапазоне 0–4 °C в других случаях ± 1 °C	ежедневно	да
Температура поверхности снега	±1 °C	ежедневно	да
Температурные профили (для снега и озер)	±1 °C	ежедневно	да
Толщина льда на реках и озерах	±0,02 м ниже 0,2 м ± 10 % выше 0,2 м	ежедневно	—
Уровень воды (в колодцах)	±0,02 м	раз в неделю	да

(продолжение)

Прямая радиация	$\pm 0,4 \text{ МДж}\cdot\text{м}^2\cdot\text{сут}^{-1}$ ниже $8 \text{ МДж}\cdot\text{м}^2\cdot\text{сут}^{-1}$ $\pm 5\%$ выше $8 \text{ МДж}\cdot\text{м}^2\cdot\text{сут}^{-1}$	Ежедневно	да
Температура воздуха	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	6 часов	да
Температура смоченного термометра	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	6 часов	да
Скорость ветра	$\pm 10\%$	6 часов	да
Испарение с водной поверхности	$\pm 0,5 \text{ мм}$	Ежедневно	да

1. В отношении фактических измерений в *Техническом регламенте* ВМО используется термин «точность наблюдений или считывания», который определяется как наименьшее значение деления шкалы, для которого возможны либо прямое считывание, либо оценка показания.
2. Может возникнуть необходимость разделения осадков на твердые и жидкые.
3. Частота наблюдений может меняться от одного часа до суток в зависимости от режима реки. Сообщение об уровне, к примеру, требуется после выпадения двух миллиметров осадков при прогнозировании ливневых паводков.
4. Зависит от чувствительности связи уровень—расход к изменению уровня и может быть точностью в  $\pm 1 \text{ мм}$ . По возможности, следует добиваться точности измерения, характеризуемой стандартным отклонением в  $\pm 5\%$ .
5. См. примечание 3. Сообщение может относиться к прогнозу мгновенных паводков.
6. Ежечасные сообщения с точностью до  $\pm 0,3^\circ\text{C}$  требуются для прогноза ледовых явлений.

должны использоваться так широко, насколько это возможно. Масштабы распространения прогнозной сети определяются следующими факторами:

- a) требованиями потребителя в отношении прогнозов в определенных местах и в отношении текущей информации о состоянии водных объектов;
- b) плотностью сети, которая необходима для описания гидрологических характеристик и размеров водных объектов;
- c) технологией передачи данных в центр прогноза;
- d) репрезентативностью наблюдений;
- e) информационными средствами для выпуска прогнозов.

Информация об эксплуатации водохозяйственных объектов должна представляться в таком виде, который соответствует нормальной оперативной обработке этих данных в организациях, занимающихся водным хозяйством, которые накапливают эту информацию.

Должен быть составлен график передачи сообщений в центр прогнозов с неавтоматических станций сети мониторинга, и сообщения должны быть подразделены на регулярно передаваемые и передаваемые эпизодически. Регулярные сообщения должны включать ежедневную информацию об уровнях воды, расходах воды, температуре и там, где это необходимо, о ледовых явлениях так же, как и результаты наблюдений за толщиной льда за каждые 5 или 10 дней, высотой снежного покрова и запасом воды в снеге. Эпизодические сообщения содержат аварийную информацию о существенных изменениях режима водных объектов, мерах оперативного контроля, так же, как и требуемые специальные сообщения, необходимые для оценки тенденции развития отдельных гидрологических явлений.

Публикация ВМО *Casebook on Hydrological Network Design Practice* [5] (Справочник по практике проектирования гидрологической сети) дает примеры плотностей пунктов наблюдений за гидрологическими переменными и содержит основные принципы их определения, основанные на временной и пространственной изменчивости этих переменных.

#### **42.6.2        Дистанционное зондирование**

Дистанционное зондирование с земли, со спутников или самолетов обладает многими очевидными преимуществами для определенных видов прогнозов. Оно дает возможность непосредственно наблюдать пространственное распространение переменных в отличие от точечных измерений и может обеспечить наблюдения над недоступной местностью и над морем. Дистанционные методы могут обеспечить прямой ввод в прогнозную схему данных о следующих площадях:

- a) площадь выпадения осадков; как качественные, так и количественные оценки;

- b) площадь затопления от наводнения;
- c) очертания облаков, включая тропосферный ветер как вход в метеорологические и, следовательно, в гидрологические модели прогноза. Радиолокатор Доплера (включая зондирование по профилям) может быть использован в дополнение к очертаниям облаков для отражения тропосферного ветра;
- d) очертания тропического циклона или траекторий движения ураганов;
- e) площадь распространения и запас воды в снежном покрове;
- f) качество воды, в частности мутность.

В следующих разделах описываются соответствующие технические средства с кратким описанием применимости разного оборудования для различных целей.

#### 42.6.2.1 *Радиолокатор*

Основные области использования радиолокатора в гидрологическом прогнозировании — следующие:

- a) для наблюдений за расположением области выпадения осадков;
- b) для оценки площади, на которую выпали осадки;
- c) для прогнозирования ливневых осадков и, следовательно, паводочных расходов воды особенно на малых водосборах.

Радиолокатор с максимальной выходной мощностью порядка 500 кВт может быть использован для оценки интенсивности и распространения осадков. Площадь охвата, для которой могут быть выполнены гидрологические вычисления на основе показаний таких радиолокаторов, ограничена 150-ю километрами при обычных условиях и только 100 километрами во время ливневых дождей. Эта проблема не имеет значения при использовании S-частотных радиолокаторов. Радиолокатор с максимальной выходной мощностью в 750 киловатт позволяет обеспечить площадь охвата в 230 километров.

Три основных типа оборудования и принципы, лежащие в основе использования радиолокатора, описаны в разделе 7.6. Наиболее точно интенсивность осадков измеряется с помощью S-частотного радиолокатора. Этот радиолокатор является более чувствительным к эффектам скрытия и к эффекту лучевого пересечения с тающим слоем (яркая полоса).

Повышенная точность количественных оценок осадков может быть достигнута, если электронная калибровка сигналов радиолокатора основана на региональных связях между радиолокатором и интенсивностью осадков по данным измерений для различных сезонов и различных типов ливней. Такая калибровка вместе с показаниями одного или более автоматических осадкомеров может быть использована для получения изображений от радиолокаторов в реальном масштабе времени.

Для некоторых гидрологических прогнозов необходима информация о предшествовавших осадках. Ее можно получить, если существуют архивы. Эта информация, объединенная с данными о фильтрационных характеристиках почвогрунтов региона, может помочь в установлении местоположения потенциальных паводкоопасных зон.

Более ранние методики ручных анализов, которые используют периодические записи экспозиций и покрытия сетки, описаны в разделе 7.6.4.2.

Более современные достижения в области применения радиолокатора включают в себя:

- a) компьютерные графики, связанные с радиолокационным изображением, показывающие интенсивность ливня с разрешением в 1 километр (или менее) 1 градуса дуги (радиальной решетки) или на картезианской решетке  $1 \times 1$  километр;
- b) обработка цифровых данных для получения суммарных осадков по площади водосбора;
- c) взаимосвязка и объединение данных по нескольким радиолокаторам с помощью телефонной связи на центральном компьютере с целью увеличения площади сканирования;
- d) автоматический контроль радиолокационной информации по данным, полученным с помощью наземных осадкомеров для осуществления прямого ввода в прогнозную модель;
- e) использование радиолокатора Доплера для прогноза мезоциклонов, которые предшествуют грозовым ливням и торнадо. Это требует измерения как эхо-отражения, так и скорости отдельных частиц осадков;
- f) методики для распознавания ложных показаний приборов от неметеорологических объектов, связанных в основном с топографическими особенностями отдельных участков местности.

Несмотря на технические сложности, отмеченные здесь и в разделе 7.6, радиолокационные методы проведения оценки осадков могут иметь определенные преимущества по сравнению с другими методами, в частности для прогнозирования ливневых паводков и определения площади выпадения осадков. Их наибольшее преимущество заключается в возможности получения большого количества данных в мелком масштабе в оперативном режиме времени. Однако, чтобы использовать эти преимущества, существенно важно иметь подходящую техническую поддержку для эксплуатации радиолокатора и вспомогательного оборудования. Также важно иметь хорошо обученных операторов и прогнозистов.

#### 42.6.2.2 *Методы, основанные на использовании спутниковой информации*

Для целей гидрологического прогнозирования прежде всего используются данные двух типов спутников: геостационарных и полярно-орбитальных. Геостационарные

спутники имеют период обращения примерно в один день и, следовательно, остаются стационарными на высоте примерно 36 000 километров над экватором, тогда как полярно-орбитальные спутники имеют орбитальный период обращения от одного до двух часов. Эффективность использования орбитальных спутников для целей прогнозирования ограничивается периодичностью их прохождения над изучаемыми районами, разрешающей способностью и характером используемого оборудования, а также его чувствительностью к участкам небосклона, затмленным облаками. Из-за этих проблем наибольшее использование нашли спутниковые изображения при долгосрочном прогнозировании, которое основано на определении снеговой линии, и для усиления синоптической интерпретации метеорологических прогнозов [1]. Дистанционные методы обеспечивают возможность слежения за изменениями в землепользовании и ландшафтах, которые должны учитываться при гидрологическом прогнозировании.

Распределение снега и изменения высоты снеговой линии в горных бассейнах часто могут быть получены более детально по спутниковым фотографиям, чем по данным наземных станций. Ограничения в использовании спутниковых изображений включают: недостаточное количество спутниковых наблюдений, влияние облачности, наличие лесного покрова, степень разрешения спутниковой информации. Количественный анализ высоты снежного покрова возможен только тогда, когда данные используются совместно с данными наземных наблюдений. Было обнаружено, что данные современных спутников с автоматической передачей изображения (АПТ) могут быть полезными при определении вскрытия ледяного покрова на озерах и водохранилищах с площадью поверхности более 500 км<sup>2</sup>.

На спутниковых снимках снежный покров кажется значительно светлее, чем поверхность, свободная от снега. Поэтому площади, покрытые снегом, легко обнаруживаются в безоблачную погоду. Снежный покров можно отличить от облаков вследствие устойчивости его очертаний (для этой цели необходимо иметь наблюдения за день или за несколько дней), а также благодаря тому, что районы, покрытые снегом, и облака имеют различную текстуру (снег имеет гладкую поверхность с острыми краями, тогда как облака кажутся неровными или комковатыми зонами с менее выраженными краями). В горных районах древовидный характер речных систем помогает опознаванию снежного покрова.

Снеговая линия оконтуривает площади, которые рассматриваются как покрытые снегом. Снеговая линия определяется как граница, очерчивающая территорию, на которой залегает снег с высотой слоя более 2-х см. Следует подчеркнуть, что анализ должен быть основан на использовании всех видов имеющихся наблюдений за снегом. Сопоставление спутниковых данных с данными снегомерных съемок показывает, что снеговая линия может быть картирована на основании спутниковых фотографий с точностью до 10–20 километров [2, 4]. Эта точность зависит от масштаба изображения.

Другими метеорологическими и гидрологическими элементами, за которыми можно проводить наблюдение и изучать их с помощью датчиков, установленных на спутниках, являются: водосодержание облаков, границы облачности, площади охвата и интенсивность выпадения осадков, наводнение в поймах, запас биомассы и влажность почвы.

Микроволновые датчики используются для измерения влажности либо в облаках, либо при выпадении дождя и площадей затопления. Пассивные системы, которые измеряют энергию, выделяемую естественным путем, могут обеспечить оценку порядка величины слоя осадков и могут фиксировать развитие крупных паводочных волн при наличии сплошного облачного покрова. В настоящее время существуют приборы, включающие микроволновый радиометр с электронным сканированием (ECMR) и спектрометр СВЧ-диапазона спутника "Нимбус- Е" (NEMS).

При метеорологическом прогнозировании привлекаются данные с геостационарных спутников, с помощью которых в результате сопоставления отдельных изображений, взятых не менее чем за 30 минут, обеспечивается вход в численные модели и визуальную информацию о погодных условиях и ураганах. Радиационная температура может быть входным элементом в расчете теплового баланса при прогнозировании снеготаяния (глава 45) и оценках суммарного испарения. Некоторые из расширенных кривых особенно полезны при анализе осадков.

Визуальная информация, обеспечиваемая с помощью спутника, может стать неоценимой для отдельных подразделов водосбора, особенно в районах, не охваченных снегосъемками. Изображения со спутников ЛАНДСАТ и СПОТ весьма полезны в таких случаях, а также тогда, когда не требуется высокая частота наблюдений, например при определении изменений качества воды в озерах и водохранилищах с помощью многоспектрального оборудования.

#### 42.6.2.3 Зондирование с борта воздушного судна

Многие приборы и виды оборудования, описанные в предыдущем разделе, могут быть установлены на самолете. Благодаря низкой высоте съемки, разрешающая способность этого метода является более высокой. Однако определенные проблемы, связанные с подготовкой самолета для краткосрочного наблюдения и трудности, вызываемые облачностью и уменьшением площади охвата съемкой, ограничивают полномасштабное использование самолетных бортовых датчиков для прогнозирования наводнений.

Бортовой самолетный радиолокатор бокового обзора (БСРБО) используется для картирования поверхностных и паводочных волн и мониторинга нарастания озерного льда и его перемещения. Оборудование радиолокаторов весьма тяжелое. Поэтому легкие самолеты обычно непригодны для указанных целей. Авиационные гамма-съемки используются для определения запаса воды в снежном покрове

(раздел 8.6) и, потенциально, для измерения влажности почвы. Ограничением применения гамма-метода является требование низкой высоты полета (150 м) [6].

#### 42.6.3 *Системы связи*

Системы связи обеспечивают передачу данных от измерительных станций в прогностический центр. Они могут быть обычными или автоматическими и могут передавать сообщения через определенные интервалы времени или только передавать предупреждение, когда происходят некоторые неординарные события.

Важное значение при определении средств связи для оперативной службы гидрологических прогнозов имеет плотность и местоположение наблюдательных станций. Большинство систем передачи данных связи имеют ограничения, связанные с их стоимостью, имеющимся оборудованием, наличием персонала, временем выхода в эфир и наличием каналов связи. Ручные и полуавтоматизированные способы, используемые в настоящее время для сбора и передачи данных, становятся непригодными для современных гидрологических моделей прогнозирования и возросших требований потребителей. Автоматизация является единственным путем ускорения сбора данных и увеличения частоты получения результатов наблюдений. Современные системы сбора данных, оборудованные компьютерами для автоматизированного сбора данных в определенном режиме или регистрации изменений в наблюдаемых величинах, позволяют избежать большинства неудобств, присущих неавтоматизированным системам. Они также позволяют расширять и совершенствовать обслуживание потребителей, запросы которых постоянно возрастают.

Прекращение ручного сбора и передачи данных связано с некоторыми неудобствами. Наблюдатели обладают хорошей способностью обобщать разноречивую информацию и сопоставлять ее с другими элементами окружающей среды, в отличие от фактических используемых цифровых записей, получаемых при помощи датчиков. Следовательно, информация от датчиков, используемых в автоматической системе может отличаться от информации, полученной наблюдателями и, следовательно, успех использования автоматической системы в сильной степени зависит от пригодности и точности соответствующих датчиков.

Опыт показывает, что в экстремальных условиях коммуникационная сеть является наиболее уязвимым элементом любой системы прогнозирования. По этой причине большое внимание должно быть уделено обеспечению надежности системы посредством установки менее уязвимого оборудования (например независимых радиоэлементов) и средств передачи. Телефонная и радиосвязь были первоначальными средствами передачи гидрологических данных от мест наблюдений в центр прогнозов. Системы связи, основой которых являются наземные линии связи, такие, как телефонные сети, подвержены повреждению во время паводков, сильных ливней и подобных экстремальных явлений, что

приводит к значительной потере информации. Скрытые кабели являются более безопасными, но в то же время значительно более дорогими. Телефонная сеть имеет преимущество в том, что она не нуждается в источнике питания на месте измерения. В большинстве случаев могут использоваться обычные абонентские телефонные линии, являющиеся гораздо менее дорогими, чем специальные линии. Однако в некоторых случаях качество и мощность стандартных наземных линий связи не позволяют обеспечивать прямое считывание показаний в компьютеры, и в этой связи возникает необходимость в более дорогих специальных линиях. Имеется радиотехническое оборудование, позволяющее персоналу центров прогнозов использовать телефон для снятия показаний дождемера или уровнемера с помощью закодированного сообщения [7].

Когда удаленность или естественные препятствия мешают применению наземных линий, для передачи данных используется радиосвязь. Потребность в передаче последовательности линейных знаков ограничивается диапазоном высокочастотной радиосвязи, если не используются станции усиления. В последнем случае это увеличивает стоимость. Установка и эксплуатация различных линий радиосвязи регламентируются национальными и международными правилами.

Детальная информация об автоматическом сборе и передаче данных гидрологических наблюдений содержится в публикации ВМО *Automatic Collection and Transmission of Hydrological Observations* [8] (Автоматический сбор и передача гидрологических наблюдений) и *Hydrological Data Transmission* [9] (Передача гидрологических данных).

#### 42.6.3.1 Спутник

В настоящее время действуют геостационарные и полярно-орбитальные спутниковые коммуникационные системы для сбора и передачи гидрологических данных и другой информации об окружающей среде. Следующие геостационарные спутники оборудованы (или будут оборудованы) для сбора и ретрансляции данных, получаемых со стационарных платформ:

ГОЕС-7 и ГОЕС НЕКСТ	эксплуатируемые США;
ГМС-4, 5	эксплуатируемые Японией;
МЕТЕОСАТ-4, 5, 6	эксплуатируемые Европейским космическим агентством;
ГОМС	эксплуатируемый Содружеством Независимых Государств;
ИНСАТ	эксплуатируемый Индией.

Каждый космический корабль может собирать данные с 10 000 или более отдельных наблюдательных станций в пределах своего передающего диапазона, который распространяется на 70° восточной и западной долготы от их местоположения и на север и юг в Арктику и Антарктику. Примером системы, действующей в

настоящее время, может служить геостационарный оперативный спутник по исследованиям окружающей среды (ГОЕС), эксплуатируемый Национальным управлением США по исследованию океанов и атмосферы (НУОА) [10]. Детали о каждой из указанных спутниковых систем описываются в работе BMO *Information on Meteorological and Other Environmental Satellites* [11] (Информация о метеорологических и других спутниках по слежению за окружающей средой).

#### 42.6.3.2 Метеорный разряд

Дальномерная связь, основанная на метеорных разрядах, используется в настоящее время для сбора гидрометеорологических данных. В систему такой связи входит одна или несколько основных станций и сеть удаленных станций по сбору данных. Связь по принципу метеорного разряда основана на свойстве электронов, содержащихся в метеорных следах, отражать или повторно излучать ОВЧ-радиосигналы, переданные основной, либо удаленными станциями. Так как след метеора существует только короткое время, обычно измеряемое миллисекундами, то, во-первых, лучше всего использовать импульсный режим передачи. Во-вторых, само появление нужным образом сориентированных и ионизированных метеорных следов меняется в зависимости от времени суток и месяца года. Сочетание этих двух факторов обуславливает прерывистый тип, который приемлем для передачи незначительного объема данных, но не постоянных сообщений.

Система связи на основе метеорного разряда предназначается для использования на сетях, имеющих максимальное расстояние между основной и удаленными станциями до 1 600 километров. Топографические препятствия между основной и удаленными станциями здесь не играют такой большой роли, как для других типов передающих систем ОВЧ. Однако в некоторых случаях между двумя станциями могут возникать обширные зоны с плохими условиями передачи информации указанным способом, когда сильные магнитные бури и солнечные вспышки могут вызывать существенные помехи. Эти моменты несколько ограничивают использование рассматриваемой системы связи для целей краткосрочного прогнозирования.

### Список литературы

1. Калинин Г. П., Курилова Ю. В., Колесов П. Л. *Космические методы в гидрологии*. Л., Гидрометеоиздат, 1977.
2. Куприянов В. В. и др. Изучение снежного покрова по данным спутниковой информации. — *Tr. ГГИ*, 1978, № 243.
3. Bobinski, E., Piwecki, T. and Zelazinski, J., 1975: A mathematical model for forecasting the flow in the Sola river. *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 20, No. 1 pp. 51–60.

4. World Meteorological Organization, 1972: *Casebook on Hydrological Network Design Practice*. WMO-No. 324, Geneva.
5. World Meteorological Organization, 1973: *Snow Survey From Earth Satellites*. WMO/IHD Report No. 19, WMO-No. 353, Geneva.
6. World Meteorological Organization, 1979: *Proceedings of the Workshop on Remote Sensing of Snow and Soil Moisture by Nuclear Techniques*, 23–27 April 1979, Voss, Norway.
7. Water Data Unit, 1977: *Interrogable Devices*. Technical Memorandum No. 16.
8. World Meteorological Organization, 1973: *Automatic Collection and Transmission of Hydrological Observations*. Operational Hydrology Report No. 2, WMO-No. 337, Geneva.
9. World Meteorological Organization, 1981: *Hydrological Data Transmission* (A. F. Flanders). Operational Hydrology Report №. 14, WMO-No. 559, Geneva.
10. Flanders, A. F. and Schiesl, J. W., 1975: Satellite-interrogated data platforms in river and flood forecasting. *Proceedings of the Tenth International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, 2–6 October 1972, Ann Arbor, Michigan, pp. 131–138.
11. World Meteorological Organization, 1989: *Information on Meteorological and other Environmental Satellites*. WMO-No. 411, Geneva.

## ГЛАВА 43

### МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

#### 43.1       **Общие положения**

В этом разделе рассматриваются основные математические и гидрологические методы, которые являются компонентами любой системы прогнозирования и критериями для выбора методов и определения параметров. В главах 44–46 приводятся примеры использования этих компонентов для решения отдельных задач.

Многие успешно применяемые методы прогноза основаны на очень простых, эмпирически установленных связях между наблюдаемой переменной, например уровнем воды в верхнем течении реки, и прогнозируемой величиной, например уровнем воды в нижнем течении реки в какой-то более поздний момент времени. Однако все в большей степени методы прогнозирования основываются на более полном физически обоснованном описании гидрологических и гидравлических процессов, например на концептуальных моделях процессов осадки—сток или таяние снега, а также моделях руслового регулирования. Эти методы не обязательно должны повышать точность прогноза. Однако их преимущество заключается в том, что они являются более гибкими с точки зрения использования большего объема информации и возможности включения новых данных и учета накопленного опыта.

Все методы прогнозирования, которые можно разделить на четыре категории (как указано ниже), должны рассматриваться с точки зрения возможности их применения к прогнозируемым ситуациям в масштабах реального времени, а не ретроспективного анализа, который целесообразен при расчетах под различные проекты. К ним относятся следующие методы:

- a) эмпирические (разделы 43.3 и 43.4) и физически обоснованные концептуальные модели (раздел 43.7) гидрологических процессов в наземном звене влагооборота;
- b) методы, основанные на процессах теплообмена в водных объектах (главы 45 и 46);
- c) эмпирические (раздел 43.4) и физические (раздел 43.8) модели для расчетов движения и трансформации паводочной волны;
- d) методы, основанные на анализе процессов атмосферной циркуляции.

Описание математических методов общего назначения, которые могут применяться в любой из вышеуказанных категорий, приведено в разделах 43.2, 43.9, 43.10 и 43.11.

### 43.2 Корреляция и регрессия

Коэффициент корреляции характеризует тесноту линейной связи между двумя переменными и очень широко применяется как математическое средство на первоначальном этапе многих гидрологических анализов. Регрессия — это расширенный корреляционный подход, который обеспечивает получение формулы, по которой можно рассчитать желаемую переменную, например сезонный низкий сток, по данным одного и большего количества имеющихся наблюдений или максимальный уровень грунтовых вод в зимний период (раздел 44.5).

Формула для расчета коэффициента корреляции  $r$  между двумя переменными  $x$  и  $y$  при длине ряда  $n$  имеет вид:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (43.1)$$

где

$$\bar{x} = \frac{I}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{и} \quad \bar{y} = \frac{I}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

Отсутствие корреляции не означает отсутствия связи. Так как  $r$  является показателем только линейной связи, четкая криволинейная зависимость не обязательно будет характеризоваться высоким значением величины  $r$ , и наоборот, корреляционная связь между двумя переменными не гарантирует того, что они причинно обусловлены. Простой график с разбросом точек около прямой линии, который является графическим представлением корреляционной связи двух переменных, служит основой метода прогнозирования максимального уровня воды в реке (раздел 43.4).

Если переменные  $x$  или  $y$  имеют некоторые направленные изменения во времени, особенно тренд, необходимо принять меры по исключению этих изменений до коррелирования, и должна соблюдаться осторожность при применении теста на значимость [2, 3, 14]. Метод временных рядов должен применяться (раздел 43.9), когда предыдущие значения переменной, например расхода воды, используются для прогнозирования значения той же переменной в какой-то момент времени в будущем.

Соответственно уравнения регрессии получили широкое распространение в гидрологии. Их общий вид — следующий:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \text{и т. д.}, \quad (43.2)$$

где  $X$  — текущие значения наблюденных переменных;  $Y$  — прогнозируемое значение переменной;  $b$  — коэффициенты регрессии, рассчитанные по наблюденным значениям  $Y$  и  $X$ . Переменные  $X$  могут включать: уровень или расход воды выше по течению реки, слой выпавших осадков, характеристики условий водосбора, температуру воздуха или сумму дождевых осадков за сезон. Переменная  $Y$  может характеризовать как минимальный, так и максимальный уровень воды. Коэффициент множественной корреляции характеризует степень достоверности установленного соотношения. Другая мера достоверности — стандартная ошибка расчета — характеризует разброс точек относительно линии регрессии. Теория корреляционного и регрессионного анализа излагается во всех общих учебниках по математической статистике [4].

В некоторых случаях применение аппарата линейной регрессии приводит к неудовлетворительным результатам, и возникает необходимость в нормализации переменных  $Y$  и  $X$ . Мощным методом преобразования является метод Бокса и Кокса, изложенный в [5], с помощью которого можно преобразовать  $Y$  в  $Y_T$  по формулам:

$$\begin{aligned} Y_T &= (Y^T - 1)/T; \quad T \neq 0, \\ Y_T &= 1n(Y); \quad T = 0. \end{aligned} \quad (43.3)$$

Эти выражения включают: степенное, логарифмическое и гармоническое преобразования на непрерывной временной шкале. Соответствующее значение  $T$  может быть найдено подбором или графически, как показано на рисунке 35.1.

Нелинейные связи можно также описать с помощью полиномов, например вводя  $X_p$ ,  $X_i^2$  или  $X_i^3$  в уравнение регрессии. С другой стороны, методы с использованием процедуры минимизации функции открывают простой путь подбора параметров строго нелинейных уравнений.

Выбор полезной замены для большого числа переменных требует определенных навыков, в частности тщательного анализа, который представляет собой разности между наблюденными и рассчитанными величинами в наборе проверочных данных. Обстоятельства, вызывающие появление больших остатков, часто подсказывают метод замены переменных. Преимущества компьютерной обработки и графического изображения остатков должны быть использованы для исследования различных сочетаний переменных. Следует избегать исключительного использования методов автоматического поиска и выбора процедур с использованием ступенчатого, поэтапного, обратного, а также предварительного отбора выборок и оптимальных группировок переменных.

Примеры применения регрессионных методов для различных задач прогнозирования даны в разделах 43.4 и 44.5.

### 43.3 Показатель увлажненности

Индекс предшествующих осадков описан в разделе 33.2.1. Этот подход во многих странах являлся первоначальным средством для оперативного прогнозирования. В качестве меры влияния осадков, выпавших за период до составления прогноза, этот индекс представляет собой показатель увлажненности верхнего слоя почвы. Наиболее часто встречающимися показателями являются индекс предшествующего увлажнения (ИПУ) и условия предшествующего увлажнения (УПУ) (раздел 33.2.1).

Методы, основанные на использовании показателя увлажненности, обладают двумя важными особенностями при их применении в гидрологическом прогнозировании. Во-первых, так как показатель увлажненности ежедневно обновляется, он приспособлен скорее для разового анализа, чем для непрерывного моделирования. Соответственно, чтобы применять его при составлении большинства прогнозов, необходимо разделить период выпадения осадков на отдельные события или разделить каждый дождь на отдельные периоды выпадения осадков. Например, во время длительного дождливого периода, прерываемого короткими периодами с малым количеством осадков или вовсе без осадков, трудно решить, был ли это один ливень или несколько.

Вторая особенность применения показателя увлажненности состоит в том, что при применении метода единичного гидрографа определяется только гидрограф поверхностного стока. Для построения гидрографа суммарного стока необходимо каким-либо другим методом определять базисный сток. Поэтому показатель увлажненности может применяться в оперативной практике в тех случаях, когда имеет значение только поверхностный сток. Применение гидрологической модели типа ИПУ в режиме непрерывного моделирования описано Ситтнером и др. [6] и Бураковым [7]. Принципы использования показателя УПУ Службы США по консервации почвы изложены в работе Бюро рекламаций США *Design of Small Dams* [8] (Проектирование малых дамб).

### 43.4 Прогнозирование максимальных уровней воды

Очень простые требования к методике прогнозирования предъявляются при составлении прогноза максимального уровня воды. На реках среднего размера для этого используются простые графики связи уровней воды в верхнем пункте с уровнями воды в нижнем уровне, обеспечивая таким образом прогноз с заблаговременностью, равной времени прохождения паводочной волны между пунктами. Эта методика представлена на рисунке 43.1.

Обычной является последовательная «цепочка» таких прогнозов, когда прогнозируемая величина уровня на «выходе» верхнего участка служит «входом» для прогноза на нижнем участке. Такого рода графики во многих случаях могут использоваться для прогноза гидрографов стока, если учитывать разницу во времени добегания на подъеме и спаде стока.

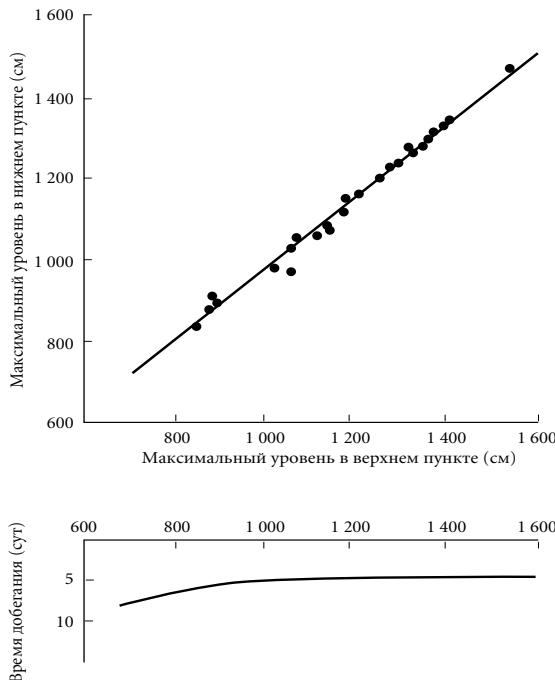


Рисунок 43.1 — Зависимость между максимальным уровнем воды и временем добегания для р. Волги

В тех случаях, когда применение простых соотношений типа «пункт—пункт» (рисунок 43.1) не дает эффекта, можно использовать следующую корреляционную зависимость:

$$(h_2)_{t+\Delta t} = f((h_1)_p I_{loc}), \quad (43.4)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  — соответственно максимальные уровни на верхнем и нижнем пунктах;  $I_{loc}$  — местный приток на участке между этими пунктами;  $\Delta t$  — время добегания. На рисунке 43.2 приведен пример зависимости такого типа. Для уменьшения числа переменных в уравнении можно использовать суммы расходов в соответствующее время по двум или более вышерасположенным постам в качестве объединенной переменной в уравнении воды по отдельным притокам.

Варианты этих основных подходов могут быть разработаны с учетом различий во времени руслового добегания и количества воды, поступающей от притоков. Графический способ решения может быть полностью заменен

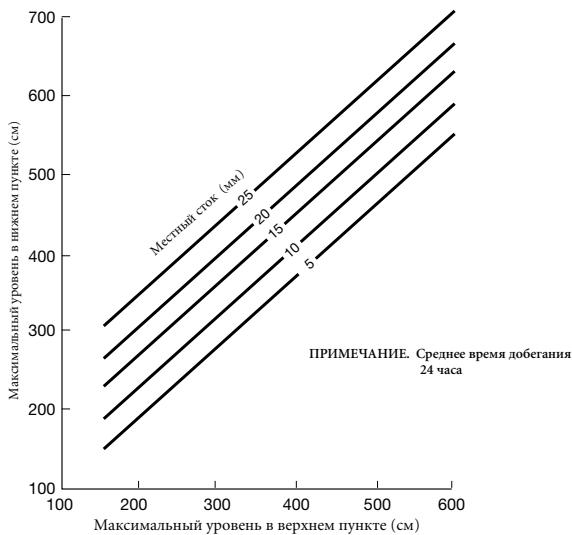


Рисунок 43.2 — Типовые зависимости между максимальными уровнями воды в двух пунктах для различных значений местного стока

численным расчетом посредством применения метода множественной регрессии (раздел 43.2). Уравнение регрессии этого типа может иметь вид

$$h_{max} = b_0 + b_1 Q_1 + b_2 Q_2 + u \text{ т. д.} \quad (43.5)$$

где  $Q_1$ ,  $Q_2$  и т. д. — расходы воды в вышерасположенных пунктах в данный момент времени. Другие обусловливающие переменные, такие, как дождевые осадки или характеристики предшествующих условий на водосборе (раздел 43.3), могут дополнять или заменять расход воды.

#### 43.5 Прогнозы стока на основании учета запасов воды в бассейне

Суммарный объем воды, содержащейся во всех реках, озерах и болотах речного бассейна, отражает текущее состояние гидрологического режима, и вследствие инерционности гидрологических процессов этот объем можно использовать для прогнозирования стока в замыкающем створе с заблаговременностью в несколько дней.

Методы определения суммарного объема воды  $W_j$  варьируются от детального анализа геометрических размеров поперечного сечения водных объектов до соотношений типа:

$$W_j = 0,5l_j(c_j A_j + d_j), \quad (43.6)$$

$$A_j = f_j H_j + g_j \quad (43.7)$$

где  $l_j$  — длина  $j$ -го участка;  $A_j$  и  $H_j$  — соответственно площадь поперечного сечения и уровень воды;  $c_j$ ,  $d_j$ ,  $f_j$  и  $g_j$  — эмпирические параметры. Для установления прогностической зависимости между стоком в замыкающем створе через  $t$  дней и суммарным объемом воды в верховьях бассейна можно использовать регрессионные методы. В качестве альтернативы можно учесть форму распределения запасов воды в бассейне и применить метод множественной регрессии для установления зависимости между прогнозируемым стоком и запасами воды в каждом из бассейнов главных притоков.

### 43.6 Прогнозирование истощения стока

Анализ кривых истощения речного стока является важным элементом анализа паводочного и низкого стока, но в задачах прогнозирования его использование в основном ограничено прогнозами низкого стока (раздел 44.6) [9]. Принципы, лежащие в основе теории истощения стока, а также некоторые практические методы определения констант и построения кривых истощения приведены в главе 35.

Вероятно, наиболее простой метод прогноза — это определение графической корреляционной связи (раздел 43.2) между стоком или уровнем воды в текущий момент времени и стоком или уровнем  $n$  ( $=1, 2, 4$  и т. д.) дней назад. Зависимость, полученная таким образом, может быть использована для экстраполяции на определенные моменты времени в будущем, если нет возмущающих влияний, например выпадения осадков. Отклонения от наиболее характерного хода линии связи часто ассоциируются с природными или антропогенными явлениями, информация о которых должна приниматься во внимание при составлении каждого прогноза.

### 43.7 Концептуальные модели речного стока

Детальное описание концептуальных моделей речного стока приводится в разделе 39.3. Следует подчеркнуть, что успешная калибровка и эффективное применение концептуальной модели зависят от массива данных, который должен содержать требуемые наблюдения необходимой надежности, точности, непрерывности и достаточной продолжительности. Существующие данные редко соответствуют всем этим критериям и обычно нуждаются в добавочных сведениях перед их применением в концептуальных моделях с целью прогнозирования. Долгосрочной целью использования этих моделей является достижение баланса между предложенной моделью бассейна и качеством, количеством и продолжительностью требующихся входных данных. Данные, собранные во время обычных наблюдений, необходимо использовать для тарировки модели и улучшения ее применения. В последние годы некоторые страны использовали концептуальные модели для оперативного гидрологического прогнозирования. До тех пор пока

национальные службы прогнозов не разработают собственную подходящую модель, они сталкиваются с трудностями выяснения преимуществ и недостатков многих моделей, предлагаемых для оперативного их использования в различных прогностических ситуациях. ВМО осуществила серию международных проектов по взаимосравнению концептуальных моделей, используемых для оперативных гидрологических прогнозов. Результаты и рекомендации, полученные по итогам выполнения этих проектов, приведены в работах *Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting* [10] (Взаимосравнение концептуальных моделей, используемых в оперативном гидрологическом прогнозировании), *Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff* [11] (Взаимосравнение моделей стока весеннего половодья) и *Simulated Real-time Intercomparison of Hydrological Models* [12] (Взаимосравнение гидрологических моделей, применяемых для расчетов в реальном масштабе времени). Характерные особенности многих таких моделей приведены в работах Флеминга [13] и Кучмента [1]. Практическое применение различных моделей описано в издании ВМО *Hydrological Models for Water Resources System Design and Operation* [15] (Гидрологические модели для проектирования и эксплуатации водохозяйственных систем).

Важно стремиться к тому, чтобы параметры модели и оценки переменных соответствовали их реальным значениям. Но даже в этом случае из-за погрешностей в данных и неточностей модели рассчитанный сток будет отличаться от наблюденного. Поэтому данные, полученные при моделировании, должны обновляться по мере поступления новых сведений с тем, чтобы привести в лучшее соответствие результаты моделирования стока с наблюденными величинами (раздел 43.10).

Главное преимущество прогнозирования с использованием концептуальных моделей состоит в том, что с помощью одной и той же модели можно выпускать различные виды прогнозов. Например, можно получить кривые условных распределений вероятностей высоких и низких расходов воды (раздел 43.11). Если гидрологическая модель объединена с расчетами регулирования стока водохранилищем или другим водохозяйственным объектом, то могут выпускаться прогнозы, которые полностью учитывают запросы этих потребителей, например прогнозы запасов воды в водохранилище. Другим применением концептуальных моделей могут быть прогнозы дефицитов влажности почвы (для предотвращения лесных пожаров) и продолжительности залегания снежного покрова.

#### 43.8 Расчет гидрографа стока

Приемы, описанные в главе 34, широко используются в практике прогнозирования.

### 43.9        Анализ временных рядов

Так как сток является индикатором состояния увлажненности водосборного бассейна, одномерный статистический анализ временных рядов можно использовать для установления прогностических зависимостей [16]. Один из таких подходов заключается в использовании моделей ARMA (авторегрессии со скользящим средним), которые хорошо подходят при применении в бассейнах с ограниченными данными об осадках, так как для прогноза требуются только сведения о предшествующем расходе воды (раздел 39.6.2):

$$Q_{t+1} = a_0 Q_t + a_1 Q_{t-1} + a_2 Q_{t-2} + \dots + b, \quad (43.8)$$

где  $Q_{t+1}$  — прогнозируемый расход с заблаговременностью в один выбранный интервал времени;  $Q_{t-i}$  — измеренные расходы, отстоящие от момента времени  $t$  на  $i$ . Коэффициенты  $a_i$  и  $b$  оцениваются методами статистического анализа временных рядов. В дополнение к прогнозируемой величине  $Q_{t+1}$  модель временного ряда позволяет получить распределение вероятных отклонений от прогнозируемой величины, т. е. оценку погрешности прогноза. Надежный прогноз среднемесячного стока по модели временного ряда может быть надежен в том случае, если ряд среднемесячных расходов больших рек и водотоков имеет высокую автокорреляцию. Это характерно для дренирующих крупные водоносные горизонты или вытекающих из озер. Но и в этих случаях прогнозы обычно бывают надежными только с заблаговременностью в 1–4 месяца.

В модель временного ряда можно включать метеорологические переменные, но при наличии таких данных часто оказывается более предпочтительным составлять прогнозы, основанные на использовании регрессионной или концептуальной модели.

Модели временных рядов могут также использоваться для определения погрешностей рядов, о чем говорится в следующем разделе.

### 43.10       Методы корректировки прогноза

Корректировки прогноза должны быть основаны на использовании выходных данных по модели и прямых измерений состояния переменных. Существует множество методов корректировки прогнозов. Если наблюдения выполняются за прогнозируемой величиной  $Y_p$ , то существует возможность осуществить корректировку последующих прогнозов с учетом известной погрешности прогноза  $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ , где  $\hat{Y}_i$  — оценка прогноза. Большинство корректировок являются результатом субъективного суждения прогнозиста, составляющего прогноз, но в последнее время разработаны различные математические методы, которые позволяют formalизовать этот процесс. Основополагающие принципы, на которых основан формальный подход, описаны ниже.

В самом простом виде корректировка может сводиться к добавлению текущей погрешности к значению, полученному по новому прогнозу. Чтобы избежать скачкообразных переходов, корректировка обычно вводится в вычисленный гидрограф через определенные интервалы времени. Более сложная процедура заключается во временном статистическом анализе рядов погрешностей  $e_1, e_2, \dots, e_i$  для выявления возможных трендов или периодических изменений, которые могут быть использованы для оценки новой потенциальной ошибки  $\hat{e}_{i+1}$ , которая может быть использована для корректировки новой прогнозируемой величины  $\hat{Y}_{i+1}$ [17].

Наблюденные величины  $Y_1, Y_2, \dots, Y_i$  можно использовать, чтобы проверить переменные в прогностической модели. Такой прием называется «рекурсивным оцениванием», и если прогностическую модель можно представить в достаточно простой форме, он служит основой для выбора формального метода корректировки выходных данных модели.

Фильтр Кальмана и расширенный фильтр Кальмана относятся к рекурсивным методам оценивания, которые применяются в гидрологическом прогнозировании [18]. Эти методы требуют значительной математической и гидрологической квалификации, чтобы представить прогностическую модель в удобной для анализа форме. Однако можно также использовать более физически обоснованный метод корректировки выходных данных гидрологической модели. Этот метод не требует изменений ни в структуре модели, ни в алгоритмах, используемых для вычислений. С помощью этого метода осуществляется корректировка входных данных и соответственно примененных таким образом, чтобы более точно воспроизвести текущие и предшествующие величины стока; эти откорректированные величины используются затем для прогноза гидрографа [19].

Корректировка прогноза не обязательно должна основываться только на выходных данных модели; она может быть выполнена путем использования данных измерений переменных для сравнения с величинами, полученными по модели. Например, в одном из методов данные измерений запаса воды в снежном покрове используются для улучшения прогнозов сезонного водоснабжения, получаемых с помощью концептуальной модели [20]. Однако непосредственная подстановка данных натуральных измерений вместо оптимизированных значений переменных модели будет неправильной, т. к. на практике упрощение модели может привести к получению результатов, выраженных в нефизических величинах.

Правильный выбор метода корректировки зависит от:

- требований пользователя;
- количества и качества имеющихся данных;
- оборудования, используемого для сбора, передачи и обработки данных;
- квалификации и опыта обслуживающего персонала.

### 43.11 Вероятностный подход в прогнозировании

Долгосрочные прогнозы, особенно сезонного стока, часто представляются в вероятностной форме, т. е. статистическим распределением вероятностей значений стока в зависимости от слоя осадков, оцениваемого на дату выпуска прогноза. Единственным источником неопределенности являются погодные условия между датой подготовки прогноза и датой его выпуска. Например, если прогноз основан на регрессионном уравнении

$$Q_{\text{лето}} = b_0 + b_1 R_{\text{осень}} + b_2 R_{\text{зима}} + b_3 R_{\text{весна}} + b_4 R_{\text{лето}} \quad (43.9)$$

то менее информативный вероятностный прогноз может быть составлен только после получения данных о дождевых осадках за предшествующую осень и зиму. Вероятностная компонента прогноза должна учитывать вероятностное распределение весенних и летних дождевых осадков, которые могут иметь место.

Если прогностическая модель не очень простая, то почти наверняка необходимо моделирование возможных значений  $Q_{\text{лето}}$  либо путем повторных выборок при различных сочетаниях величин  $R_{\text{весна}}$  и  $R_{\text{лето}}$  из их распределений вероятностей, либо путем ввода в модель сведений о сочетаниях этих величин за период наблюдений. В первом случае необходимо учесть любую корреляцию, которая может существовать между независимыми переменными. Если же используются исторические данные, желательно иметь период наблюдений не менее чем за 30 лет, чтобы получить репрезентативный ряд возможных сочетаний.

Составление вероятностных прогнозов не ограничено регрессивными моделями. Любая гидрологическая прогностическая модель может быть насыщена ретроспективными реальными или комбинированными данными в целях получения распределения вероятностей выходных данных. Более реалистическое описание распределения реальных величин получается в случае, если входит «шум» или случайная независимая переменная. Этого можно достичь добавлением к каждому прогнозируемому значению случайного числа, стандартное отклонение которого равно стандартной погрешности оценки по модели.

Вероятностный подход в прогнозировании не следует смешивать с оценкой ошибки прогноза. Последняя является внутренним свойством модели и представляет собой погрешность, обусловленную неадекватностью модели и ошибками исходных данных. Возможно, наилучшим способом различать их является представление о вероятностном прогнозировании как о выражении возможного диапазона колебаний выходных данных для тех условий, которые могут возникнуть до даты прогноза, в то время как ошибка прогноза является полностью неопределенной характеристикой, связанной только с состоянием развития науки прогнозирования. Сейчас исследуются статистические подходы,

которые позволяют учесть все источники неопределенности (ошибку данных, ошибку модели, будущую погоду и т. д.) при составлении прогноза в вероятностной форме [21].

### Список литературы

1. Кучмент Л. С. *Математические модели речного стока*. Л., Гидрометеоиздат, 1972.
2. Walker, G., 1950: Apparent correlation between independent time series of autocorrelated observations. *Biometrika*, Vol. 37, pp. 184–185.
3. Bartlett, M. S., 1935: Some aspects of the time correlation problem in regard to tests of significance. *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. 98, pp. 536–563.
4. Draper, N. R. and Smith H., 1966: *Applied Regression Analysis*. Wiley, New York.
5. Box, G. E. P. and Cox, D. R., 1964: An analysis of transformation. *Journal of the Royal Statistical Society, section B*, Vol. 26, pp. 211–252.
6. Sittner, W. T., Schauss, C. E. and Monro, J. C., 1969: Continuous hydrograph synthesis with an API-type hydrological model. *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 5.
7. Burakov, D. A., 1967: Flood hydrograph calculation with runoff transformation in basins and channels taken into account. *Proceedings of the WMO/UNESCO Symposium on Hydrological Forecasting*. 29 November—5 December 1967, Surfers' Paradise, Queensland, Australia, pp. 139–146. In: World Meteorological Organization, 1969: *Hydrological Forecasting*. Technical Note No. 92, WMO-No. 228, Geneva.
8. U.S. Bureau of Reclamation, 1960: *Design of Small Dams*. Appendix A, Washington, D.C., pp. 413–431.
9. Riggs, H. C. and Hanson, R. L., 1967: Seasonal low-flow forecasting. *Proceedings of the WMO/UNESCO Symposium on Hydrological Forecasting*. 29 November-5 December 1967, Surfers' Paradise, Queensland, Australia, pp. 286–299. In: World Meteorological Organization, 1969: *Hydrological Forecasting*. Technical Note No. 92, WMO-No. 228, Geneva.
10. World Meteorological Organization, 1975: *Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting*. Operational Hydrology Report No. 7, WMO-No. 429, Geneva.
11. World Meteorological Organization, 1986: *Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff*. Operational Hydrology Report No. 23, WMO-No. 646, Geneva.
12. World Meteorological Organization, 1992: *Simulated Real-time Inter-comparison of Hydrological Models*. Operational Hydrology Report No. 38, WMO-No. 779, Geneva.

13. Fleming, G., 1975: *Computer Simulation Techniques in Hydrology*. Elsevier, New York.
14. Wallis, J. R. and O'Connell, P. E., 1972: Small sample estimation of P1. *Water Resources Research*, Vol. 8, pp. 707–712.
15. World Meteorological Organization, 1990: *Hydrological Models for Water Resources System Design and Operation*. Operational Hydrology Report No. 34, WMO-No. 740, Geneva.
16. Box, G. E. P. and Jenkins, G. M., 1976: *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco.
17. Jamieson, D. G., Wilkinson, J. C. and Ibbitt, R. P., 1972: Hydrologic forecasting with sequential deterministic and stochastic stages. *Proceedings of the International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems*, 11–14 December 1972, Tucson, Arizona.
18. Todini, E. and Wallis, J. R., 1978: A real-time rainfall runoff model for an online flood warning system. *Chapman Conference on Applications of Kalman Filter Filtering Theory and Techniques to Hydrology, Hydraulics and Water Resources*, American Geophysical Union, 22–24 May 1978, Pittsburgh, Pennsylvania.
19. Sittner, W. T. and Krouse, K. M., 1979: *Improvement of Hydrologic Simulation by Utilizing Observed Discharge as an Indirect Input (Computed Hydrograph Adjustment Technique — CHAT)*. NOAA Technical Memorandum NWS HYDR0-38, February, U.S. Department of Commerce.
20. Carroll, T. R., 1978: A procedure to incorporate snow course data into the National Weather Service river forecast system. *Workshop on Modelling of Snow Cover Runoff*, American Geophysical Union and American Meteorological Society, Corps of Engineers and National Weather Service, 26–29 September 1978, Hanover, New Hampshire.
21. Kitanidis, P. K. and Bras, R. L., 1978: *Real Time Forecasting of River Flows*. Technical Report No. 235, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.



## ГЛАВА 44

### ПРОГНОЗЫ ПАВОДКОВ И ВОДОСНАБЖЕНИЯ

#### 44.1       **Общие положения**

В предыдущей главе дано описание гидрологических и гидравлических методов, которые могут быть использованы для разных целей. В этом разделе речь пойдет об этих методах применительно к двум наиболее часто встречающимся группам прогнозов — прогнозам паводков и прогнозам в целях водоснабжения. Эти две группы прогнозов подразделяются на несколько важных подгрупп, таких, как прогнозы ливневых паводков, затоплений, штормовых нагонов, а также волн прорыва.

#### 44.2       **Прогнозирование паводка**

**[J04, J10, J15]**

Необходимость выпуска прогнозов и предупреждений о паводках служит основной причиной организации службы гидрологических прогнозов. Это очевидно, так как паводки, по всей видимости, являются наиболее опасным гидрологическим явлением, вызывающим каждый год во всем мире гибель людей и причиняющим большой материальный ущерб.

Правильность выбора метода прогноза паводка зависит от следующих факторов:

- a) типа паводка;
- b) степени развития службы прогнозов, т. е.: сети наблюдений, телекоммуникационной связи и средств обработки информации;
- c) длительности и качества рядов наблюдений;
- d) наличия квалифицированного персонала.

Обычно требуется прогноз следующих параметров паводка:

- a) уровень и расход воды: их максимальные значения и изменения во времени (гидрограф), включая: время начала паводка, время наступления пикового уровня/расхода воды, продолжительность паводка, а также будет ли и когда превышен максимальный допустимый уровень;
- b) объем стока за паводок;
- c) скорость распространения гребня паводочной волны по руслу реки, вклад притоков и характер совпадения паводка на главной реке и притоках;
- d) площадь затопления и ее изменения во времени и пространстве;

- e) влияние ледовых явлений на распространение паводочной волны и возможность образования заторов льда;
- f) влияние штормового нагона, плавающих обломков, влияние работы шлюза или водохранилища на распространение паводочной волны.

Для самых обычных паводков, вызываемых ливневыми осадками, могут применяться следующие методы прогнозирования: корреляционный анализ (раздел 43.2); расчет показателя увлажненности (раздел 43.3); связь между максимальными уровнями в разных пунктах по длине реки (раздел 43.4); оценка расхода воды как функции запасов воды в русле (раздел 43.5); концептуальные модели (раздел 43.7) и расчет трансформации стока в русле (глава 34). Составление своевременного прогноза стока с использованием гидродинамического метода требует быстродействующего компьютера с достаточным объемом памяти. При применении других методов можно обойтись менее мощной вычислительной техникой. При использовании многих методов гидрологического прогнозирования, описанных в главе 43, например: метода показателя увлажненности, корреляционного, вычисления среднего, сумм и стандартных статистик — можно вообще обойтись без компьютера. Расчеты можно ускорить, если использовать предварительно подготовленные вспомогательные графики, таблицы и номограммы.

#### 44.3 Мгновенные паводки

##### 44.3.1 Общие положения

При быстром отклике малых водосборов, например когда время добегания воды составляет менее шести часов, интенсивное выпадение дождевых осадков может вызвать мгновенный паводок. Такие паводки развиваются настолько быстро, что являются полной неожиданностью для жителей речных пойм. Обычно в таких ситуациях невозможно применить достаточно быстро методы прогнозирования паводков, применяемые для больших рек, чтобы обеспечить эффективный прогноз паводка с достаточной заблаговременностью. Более того, расчет паводка представляет большие затруднения из-за высокой пространственно-временной изменчивости осадков, вызывающих такие паводки.

Проблема мгновенных паводков рассматривалась на нескольких симпозиумах, в том числе на международном симпозиуме, проведенном МАГН/ЮНЕСКО/ВМО [15] и Американским метеорологическим обществом [2].

Применение радиолокатора и спутников (разделы 42.6.2.1 и 42.6.3.1) в сочетании с наземными наблюдениями позволяет повысить точность прогнозов дождевых осадков и оценок их пространственного распределения.

До настоящего времени не разработано надежного и универсального метода прогнозирования мгновенных паводков, поэтому в каждом отдельном случае

возникают конкретные проблемы. Для предупреждения о мгновенных паводках можно использовать совместно следующие три приема или один из них:

- a) индивидуальные программы прогноза и оказания помощи;
- b) системы, подающие сигналы при мгновенных паводках;
- c) общие сводки предупреждения.

#### 44.3.1.1 *Программы подготовки прогноза*

Системы самостоятельного предупреждения о наступлении мгновенных паводков создаются местным населением, при этом недопустимы задержки ни в сборе данных, ни в распространении прогнозов. Местный координатор по предупреждению о наступлении паводка готовит предупреждения о надвигающемся паводке, основываясь на заранее известных методах или моделях, разработанных квалифицированными службами прогнозов. Эти приемы могут применяться, когда данные, полученные в реальном времени и/или прогноз дождевых осадков указывают на потенциальную возможность затопления. Уравнения множественной регрессии (43.2) представляют собой простой для использования метод прогнозирования мгновенных паводков. Этот метод пригоден для применения в широком диапазоне таких условий формирования паводков как дождевые осадки, влажность почвы и температура воздуха. В публикации бывшей Организации Объединенных Наций по оказанию помощи в случае стихийных бедствий [3]дается пример использования простой таблицы признаков наступления паводка.

Возрастающие возможности использования микропроцессоров будут усиливать тенденцию автоматизации большей части процесса сбора и обработки данных, необходимых для подготовки предупреждений о мгновенных паводках. Автоматические датчики по измерению осадков и уровней воды могут напрямую через канал связи быть связаны с компьютером, который будет управлять системой сбора данных, рассчитывать вероятность наступления паводка или составлять прогноз паводка и даже подавать сигнал опасности. Использование таких компьютеров позволяет упростить некоторые версии концептуальных моделей речного стока (раздел 43.7) путем замены некоторых элементов простыми приемами, принятыми при традиционных вычислениях. Наиболее критическим элементом в системе самопомощи является активное участие общественности в планировании спасательных мероприятий и обучении людей действиям, которые они должны немедленно предпринять при получении предупреждения о паводке.

#### 44.3.1.2 *Системы предупредительных сигналов*

Система предупредительных сигналов о мгновенных паводках является автоматизированной версией системы самопомощи. Датчик уровня устанавливается по течению реки выше участка, для которого составляется прогноз, и соединяется при помощи наземной связи или радиосвязи с пунктом приема в населенном месте,

например с пожарной станцией или полицейским участком, осуществляющими круглосуточное дежурство. Такие пункты приема оснащены звуковой и световой сигнальными установками, имеющими релейные контакты для приведения в действие внешних сигналов. Сигнал тревоги включается, когда датчик уровня воды в реке фиксирует критическую высоту. Такую систему можно также эксплуатировать, используя несколько осадкомеров, хотя определить критическую величину осадков значительно сложнее, чем критический уровень воды в реке, так как для этого необходимо располагать способом пересчета интенсивности дождевых осадков в критические уровни мгновенных паводков.

#### 44.3.1.3 *Сводки и предупреждения*

Когда невозможно применить ни один из двух вышеуказанных подходов (обычно в случаях временных водотоков), даются более общие предупреждения. В нескольких странах, если наблюдаются или прогнозируются метеорологические условия, указывающие на возможное выпадение ливневых осадков, то по радио и/или телевидению передаются сводки для жителей района о возможном наступлении паводка из-за ливневых осадков.

Когда поступает сообщение о выпадении ливневых осадков, которые могут вызвать паводок, то сводка сопровождается предупреждением, благодаря чему население успевает предпринять необходимые меры защиты от паводка.

#### 44.3.1.4 *Мгновенные паводки и качество воды*

Мгновенные паводки могут существенно влиять на качество воды [4], что имеет особое значение при использовании речных вод для водоснабжения. Мгновенный паводок, образовавшийся в верховьях бассейна выше водоочистных сооружений, может приводить к значительному увеличению содержания наносов и обломков в паводочных водах, которые при наличии прогноза можно легко задержать на водоочистных сооружениях.

В то же время имеется возможность значительного удаления с помощью паводочных вод других физических компонентов канализационной системы путем промывки труб и эффекта обратного давления в канализационных коллекторах, а также удаления из подземных вод масел и токсических веществ.

#### 44.3.2 *Затопление городских территорий*

Различают два вида затопления города. Первый — когда городская территория затапливается водами рек, вышедших из своих берегов. Зоны затопления в этом случае предсказываются на основании прогноза уровня воды в реке. Второй — когда затопление является особым случаем мгновенного паводка. В этом случае интенсивные ливневые осадки на городской территории могут явиться причиной затопления улиц и построек на пониженных

участках, сооружений, расположенных в руслах старых водотоков, подземных переходов, низких участков шоссе и т. д. Такие паводки возникают, прежде всего, из-за недостаточной пропускной способности канализационных систем, что усугубляется засоренностью люков канализационных труб, скоплениями мусора, который засоряет входные и выходные отверстия трубопроводов и каналов.

В системах предупреждений о затоплениях в городских условиях могут использоваться те же схемы, которые применяются в системах предупреждения о мгновенных паводках на реках. Такая схема обычно включает в себя автоматическую систему предупреждения о наступлении мгновенного паводка или предупреждения общего характера, поскольку рассматриваемые территории часто недостаточно велики по площади, чтобы рассчитать с необходимой заблаговременностью величину стока по данным о выпавших осадках. На улицах города, подверженных затоплению, предупреждение для транспорта может иметь вид световых сигнальных установок, действующих на тех же принципах, что и системы предупреждения о мгновенных паводках на реках. Затопление городских территорий оказывает воздействие на состояние канализационных систем даже в том случае, когда сточные воды и паводочные воды сбрасываются по разным трубопроводам. Прогноз стока с городской территории может способствовать лучшей работе канализационных систем и регулированию загрязненности паводочных вод в комбинированных системах.

Противоположной проблемой является высокий уровень загрязнения городских стоков. Поскольку сток с городской территории в конечном счете попадает в естественные водотоки, то водопользователи ниже по течению реки сталкиваются с проблемами загрязнения воды. Прогноз степени загрязнения вод напрямую связан с прогнозом ливневого стока с городских территорий.

#### 44.3.3 *Прорыв плотин*

Катастрофическое наводнение от мгновенного паводка имеет место в случае прорыва плотины (независимо от того, построена ли эта плотина человеком, или образовалась естественная запруда в результате скопления льда, мусора и т. д.), когда через образовавшуюся брешь в плотине устремляется вода и затапливает нижерасположенные участки долины. Сток при разрушении плотины, как правило, во много раз превосходит максимальный расход воды во время предшествующих паводков. Собрано немного информации о характере разрушений искусственных или естественных плотин. Отсюда прогноз наводнения при разрушении плотины в реальном времени почти всегда ограничивался случаями, когда наблюдалось разрушение плотины. Последствия от прорыва плотины должны учитываться на стадии планирования сооружения плотины, когда оцениваются площади затопления нижерасположенных участков и намечаются мероприятия по защите от затопления или эвакуации населения.

В ранних классических исследованиях этой проблемы предполагалось мгновенное разрушение плотины и идеализированные условия нижнего бьефа. Позднее инженеры предложили подход к решению этой проблемы, исходя из предположения, что гидрограф стока имеет треугольную форму и определяется по уравнению Шоклича или подобному уравнению максимального стока:

$$Q_m = \frac{8}{27} \sqrt{g W_d Y_o^{3/2}}, \quad (44.1)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $W_d$  — ширина прорыва плотины;  $Y_o$  — высота уровня воды позади плотины. Используя уравнение (44.1) и эмпирический коэффициент спада волны, рассчитывается искусственный гидрограф трансформации волны в нижерасположенной долине. Для таких вычислений могут использоваться гидрологические методы расчета трансформации паводочной волны в русле, например модифицированный метод Палса [5]. Примеры применения такого подхода даются Советом по водным ресурсам в *Proceedings of Dam-break Flood Routing Model Workshop* [6] (Материалы семинара по моделированию катастрофических паводков, вызванных разрушением плотин). В той же работе приводится более реалистический подход, при котором используются динамические методы расчета трансформации паводочной волны (раздел 34.2) для расчета трансформации быстро изменяющейся и относительно большой волны прорыва. В расчете принимаются во внимание нижерасположенные плотины, объем вышедшей из берегов воды, нижерасположенные насыпи шоссейных дорог и потери при расширении и сужении речной долины.

Так как время является существенным фактором при составлении прогноза паводка от прорыва плотины в реальном масштабе времени, расчетный метод должен быть эффективным с точки зрения затрат времени на вычисления. Если используется динамический метод расчета, то необходимо сделать все, чтобы минимизировать количество данных о поперечном сечении, необходимых на стадии прогноза трансформации волны прорыва, и все данные и программные файлы должны быть готовы к немедленному использованию.

#### 44.4 Штормовые нагоны в реках

Штормовые нагоны в открытых морях возникают под воздействием ветра и изменений атмосферного давления. Они могут быть причиной возникновения гравитационных волн, которые распространяются вверх по течению рек, впадающих в моря. Поскольку движение гравитационной волны вверх по течению реки противоположно естественному стоку, расчет трансформации штормового нагона может быть выполнен гидрологическим методом (раздел 34.2). Гидрологические методы, такие, как метод кинематической волны, непригодны для расчета движения волны вверх по течению реки. Кроме того, инерционные

компоненты гравитационной волны, которые не принимаются во внимание при расчетах по диффузионно-гидравлическим методам, на самом деле слишком важны, чтобы ими пренебрегать при расчетах штормовых нагонов.

Сильные ливневые осадки, выпадающие на сушу, иногда сопровождаются штормовым нагоном, распространяющимся по реке. В этом случае прогноз штормового нагона должен включать две составляющие — движение гравитационной волны, направленной вверх по течению реки, т. е. собственно штормовой нагон, и распространение гравитационной волны, направленной вниз по течению, т. е. волну паводка. Подходящие методы прогнозирования развития и распространения штормового нагона в открытом море, т. е. модель национальной службы погоды SPLASH [7], и его движения в заливах, которые представлены Оверлэндом в работе *Estimation of Hurricane Storm Surge in Apalachicola Bay, Florida* [8] (Оценка ураганного штормового нагона в заливе Апалачикола, Флорида), необходимы для определения штормового нагона в устье реки, после чего с помощью динамического метода рассчитывается трансформация волны вверх по течению реки. Ряд работ по проблеме приливов в реках представлены в *Proceedings of the International Workshop on Storm Surges, River Flows and Combined Effects* [9] (Труды Международного совещания по штормовым нагонам, речному стоку и комбинированным эффектам), проведенного под эгидой ЮНЕСКО.

#### 44.5 Прогнозы водоснабжения

[J22]

Прогнозы речного стока для нужд водоснабжения являются существенным элементом эксплуатации коммунальных и промышленных систем водоснабжения, ирригационных и гидроэнергетических систем. Прогнозы обычно выпускаются в виде объемов стока за определенные периоды времени, например: год, сезон или месяц. Продолжительность такого периода зависит от характера спроса на воду и от количества воды в системе. Так как прогнозы для нужд водоснабжения составляются за более длительные промежутки времени, чем метеорологические прогнозы, неизбежны погрешности из-за неучета климатических явлений, происходящих в прогнозируемый период. Поэтому рекомендуется для некоторых переменных выпускать прогнозы с указанием вероятности превышения прогнозируемой величины (раздел 43.11).

Выбор метода прогноза определяется характером водосбора и имеющимися в наличии данными и требованиями, предъявляемыми потребителями к прогнозу.

Прогнозы для целей водоснабжения могут составляться с использованием трех различных методов:

- a) прогнозов снеготаяния;
- b) концептуальных моделей;
- c) анализа временных рядов.

Методы оценки снеготаяния применяются для бассейнов, где сток за счет таяния снега преобладает в общем стоке. В главе 45 дано описание методов, применяемых для прогнозирования таяния снежного покрова. Обычно для прогноза сезонного стока устанавливаются регрессионные связи с измеренными запасами воды в снежном покрове и потерями на водосборе (раздел 43.2). Например, для р. Инд были установлены связи расходов воды со спутниковыми данными о снежном покрове. В итоге, для этого бассейна были получены приемлемые результаты, несмотря на ограниченное количество данных наблюдений по земным станциям [10].

Методы расчета снеготаяния в основном пригодны для прогноза суммарного объема стока и не дают распределения стока во времени. Часто однако, распределение стока во времени и максимальный расход воды связаны с объемом стока. Распределение стока во времени, таким образом, может быть оценено, например методом единичного гидрографа.

Концептуальные модели (раздел 43.7) можно использовать для прогнозирования в целях водоснабжения путем нескольких итераций и использованием исторических рядов данных на входе в модель (раздел 43.9). Результатом такого расчета становится ряд прогнозируемых величин, вероятность превышения которых может быть установлена.

Модели, используемые для прогнозирования в целях водоснабжения, должны быть откалиброваны так, чтобы отклонения между наблюденными и рассчитанными значениями стока были минимальными. Поскольку кратковременные изменения не имеют большого значения, модели с простыми структурами могут дать удовлетворительные результаты.

Методы, основанные на исследовании временных рядов (раздел 43.9), могут быть полезны при составлении прогнозов для водоснабжения при условии, что расход воды является надежной характеристикой состояния бассейна. Прогностические уравнения обычно легки в применении. Регрессионные модели, в которых сезонный сток прогнозируется в зависимости от климатических переменных, можно рассматривать как особый случай методов анализа временных рядов (уравнение (44.2)).

#### 44.6 Низкий сток

Кратко- и среднесрочные прогнозы низкого стока могут основываться на характеристиках истощения стока в бассейне (разделы 35.5 и 43.6). В некоторых случаях требуется учет особых обстоятельств, которые могут искажать кривую истощения стока по сравнению со средней кривой, например: антропогенное влияние, такое, как забор воды на орошение; локальные различия увлажненности водосбора, приводящие к тому, что базисный сток формируется не со всего водосбора, а с его отдельных частей; сезонные колебания, обусловленные развитием водной растительности; влияние притоков.

Долгосрочные прогнозы обычно основываются на методах корреляционного или регрессионного анализа (раздел 43.2) с использованием почвенной влаги и климатических факторов, таких как дождевые осадки и температура воздуха, в качестве определяющих переменных. Во многих случаях в осадках за предшествующий период выделяются отдельные сезонные составляющие, которые входят в уравнение связи с относительными весовыми коэффициентами. Выделение сезонных осадков помогает также определить время запаздывания в системе осадки-сток [11, 12].

В водотоках, где подземные воды являются главным компонентом общего стока, расход воды в родниках может служить полезной определяющей переменной, характеризующей запасы подземных вод. Примеры прогнозирования низкого стока рек по характеристикам условий водоносных горизонтов представлены Бюро исследований в области геологии и минеральных ресурсов в *Situation hydrologique et prévision de bases eaux* [13] (Гидрологическая ситуация и прогноз низкого стока). Низкий сток рек, расходы воды которых формируются в основном за счет снеготаяния за предшествующий период, прогнозируются с использованием характеристик снежного покрова, таких, как запас воды в снеге, или по связям с пространственным распределением снежного покрова.

Как правило, для долгосрочного прогнозирования низкого стока используются приемы математической статистики. Так, например, прогноз имеет следующий вид: при условии, что текущий расход воды составляет  $100 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ; через две недели этот расход будет менее  $80 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  с вероятностью 0,1; от 80 до  $100 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  с вероятностью 0,3; от 100 до  $120 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  с вероятностью 0,2 и т. д. Для подготовки прогноза можно использовать матричные методы условных переходов или прогностические уравнения типа [15]

$$Q_{t+1} = Q_{t+1} | Q_t + kP, \quad (44.2)$$

где  $Q_{t+1}$  — прогнозируемый расход;  $Q_{t+1}|Q_t$  — расход воды при условии отсутствия дождя, т. е. на ветви спада гидрографа в период между  $t$  и  $t+1$ ;  $P$  — дождевые осадки, дающие добавку к стоку в момент времени  $t+1$ ; и  $k$  — переходный коэффициент.

Статистические методы, основанные на использовании матричных методов условных переходов и теории марковских цепей, можно использовать для калибровки этого выражения с использованием данных об осадках и стоке. Кроме того, можно применить подход, описанный в разделе 43.11, для определенных пределов возможных сезонных колебаний стока в зависимости от диапазона условий в промежуточном сезоне.

Другим подходом является использование долговременных рядов стока или водно-балансовых моделей, основанных на исторических климатологических данных для обеспечения вероятностных прогнозов низкого стока.

Кроме этого, для прогнозирования низкого стока требуются оценки фильтрации воды в берега и испарения с водной поверхности. Это особенно важно при прогнозировании влияния попусков воды из водохранилища, а также влияния других водохозяйственных мероприятий.

### Список литературы

1. Гуревич М. И. Прогнозы летнего и осеннего стока равнинных рек на основе его зависимости от осадков. — *Tr. ГГИ*, 1956, том 53, № 107.
2. American Meteorological Society, 1978: *Conference on Flash Floods: Hydro-meteorological Aspects and Human Aspects*, 2–5 May 1978, Los Angeles, California.
3. United Nations Disaster Relief Organization, 1976: *Disaster Prevention and Mitigation: A Compendium of Current Knowledge*. Volume 2, Hydrological aspects, UNDRO/22/76.
4. Fisher, S. G. and Minckley, W. L., 1978: Chemical characteristics of a desert stream in flash flood. *Journal of Arid Environment*, Vol. 1, pp. 25–33.
5. Sittner, W. T. and Krouse, K. M., 1979: *Improvement of Hydrologic Simulation by Utilizing Observed Discharge as an Indirect Input (Computed Hydrograph Adjustment Technique — CHAT)*. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-38, February, U.S. Department of Commerce.
6. Water Resources Council, 1977: *Proceedings of Dam-break Flood Routing Model Workshop*. 18–20 October 1977, Bethesda, Maryland. U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, PB-275 437 NTIS, Springfield, Virginia.
7. Jelesnianski, C. P., 1974: *SPLASH II: General Track and Variant Storm Conditions*. NOAA Technical Memorandum, NWS, TDL-S2, U.S. Department of Commerce, March.
8. Overland, J. E., 1975: *Estimation of Hurricane Storm Surge in Apalachicola Bay, Florida*. NOAA Technical Memorandum, NWS-17, U.S. Department of Commerce, March.
9. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1991: *International Workshop on Storm Surges, River Flow and Combined Effects*. 8–12 April 1991, Hamburg, A contribution to the UNESCO-IHP project H-2-2.
10. Rango, A., Salmonson, A. V. V. and Foster, J. L., 1977: Seasonal streamflow estimation in the Himalayan region employing meteorological satellite snow cover observations. *Water Resources Research*, Vol. 14, pp. 359–373.
11. Bodwell, V. J., 1971: Regression analysis of non-linear catchment systems. *Water Resources Research*, Vol. 7, pp. 1118–1125.
12. Wright, C. E., 1975: *Monthly Catchment Regression Models: Thames Basin*. Central Water Planning Unit, Technical Note No. 8, Reading, U.K., August, p. 32.
13. Bureau de recherches géologiques et minières, 1978: *Situation hydrologique et prévision de basses eaux*. Bulletin No. 5, juin 1978, Orléans, France.

14. Pegram, G. G. S. ,1971: A note on the use of Markov chains in hydrology. *Journal of Hydrology*, Vol. 13, pp. 216–230.
15. International Association of Hydrological Sciences, 1974: *Proceedings of the International Symposium on Flash Floods — Measurements and Warning*. Paris, 9–12 September 1974, Publication No. 112.



## ГЛАВА 45

### ПРОГНОЗЫ ТАЛОГО СТОКА

#### 45.1       **Общие положения**

Во многих странах используются методы прогнозирования, основанные на концептуальных моделях талого стока (раздел 43.7). Такие методы [6] делают возможным прогнозировать талый сток на основе данных наблюдений и метеорологических прогнозов. Выпуск кратко- и среднесрочных прогнозов возможен для равнинных рек, а средне- и долгосрочных прогнозов для рек горных районов. Прогнозы сезонных величин стока могут составляться и для равнинных, и для горных бассейнов, в которых талый сток составляет значительную часть суммарного речного стока.

Сток за счет снеготаяния является характерной чертой режима равнинных рек в районах с умеренным и холодным климатом и некоторых крупнейших рек мира даже в тропической зоне. Весенний сток многих рек составляет 50–70 % годового стока, а в засушливых районах эта величина может составлять 80–90 %. Наиболее важные прогнозируемые элементы талого стока — объем стока, максимальный расход и наивысший уровень воды.

#### 45.2       **Процессы формирования талого стока на равнинных и горных реках**

Во время таяния снежного покрова многие процессы, определяющие сток с равнинных и горных бассейнов, протекают одинаково, например: таяние снега, задержание воды в снеге, поступление талых вод на водосбор, потери талых вод, водоотдача бассейна, а также время добегания талого стока до замыкающего створа. С другой стороны, некоторые процессы в этих бассейнах имеют определенные различия. Например, межгодовая изменчивость потерь талого стока, образовавшихся за счет таяния снега и поступления свободной воды, намного больше в равнинных бассейнах по сравнению с горными.

Суммарный сток весеннего половодья равнинных бассейнов зависит от запасов воды в снежном покрове к началу снеготаяния, количества осадков, выпавших после начала снеготаяния, и количества воды, затраченной на инфильтрацию и испарение с речного бассейна. Первый фактор можно определить путем измерений (глава 8). Второй фактор — количество

выпавших осадков после начала снеготаяния — должен быть определен методом прогноза либо вероятностным способом, либо по средним значениям климатических характеристик.

Третий фактор — потери талого стока в бассейне — определяется инфильтрационной способностью почвы и емкостью поверхностных понижений, включая крупные некапиллярные поры в верхнем слое почвы. Потери на испарение относительно малы и мало меняются от года к году.

Размер площади, занятой понижениями, может быть выражен математически в виде функций распределения площадей в зависимости от слоя воды, необходимого для заполнения этих понижений. Такие функции являются относительно устойчивыми для каждого речного бассейна.

Инфильтрация воды в почву в период снеготаяния является фактором, который сильно меняется от года к году в зависимости от состояния почвы. Скорость инфильтрации воды в мерзлую почву и суммарное количество поглощенной воды зависят от влажности почвы, ее температуры, глубины промерзания и физико-механических свойств почвы.

### 45.3 Прогностические модели

В принципе концептуальная модель талого стока — это объединение стандартной методики расчета аккумуляции и абляции снежного покрова с моделью дождевого стока. Такая объединенная модель может использоваться для составления прогнозов стока в течение всего года в любых климатических условиях. Модели талого стока были также разработаны специально для расчета стока в период весеннего снеготаяния. В отличие от концептуальных моделей, описывающих все фазы гидрологического цикла, модели талого стока имеют много упрощений, особенно относящихся к расчету испарения и влажности почвы [3]. С другой стороны, современные модели весенного стока могут с большими подробностями учитывать влияние промерзания почвы, чем обобщенная концептуальная модель при расчете стока за весенний сезон.

#### 45.3.1 Методы индексов

Многие прогнозы объемов стока (как средне-, так и долгосрочные) основаны на методах индексов (статистических методах). Имеющиеся данные об осадках и снежном покрове в горах не позволяют, как правило, определять снегозапасы и могут служить лишь индексом этой величины. По этой причине взаимосвязи между сезонным стоком и индексом снегонакопления носят статистический характер. Будучи пригодными для прогностических целей, они в большинстве случаев не могут использоваться для водно-балансового анализа.

Оправдываемость долгосрочного прогноза зависит главным образом от того, насколько точно индекс снегонакопления отражает фактические

условия. Существуют, по крайней мере, два дополнительных фактора, которые могут оказывать влияние на сток и, следовательно, на корреляционную связь между стоком и индексом снегонакопления:

- a) запасы подземных вод за предшествующий период;
- b) количество осадков, выпавших в течение весеннего снеготаяния.

В тех речных бассейнах, где базисный сток из водоносных горизонтов составляет существенную часть суммарного стока и где он значительно меняется от года к году, надежность корреляционной связи может быть увеличена за счет учета запасов подземных вод.

Осадки, выпавшие в период снеготаяния, можно учитывать двумя способами:

- a) путем сложения индекса осадков с индексом снегонакопления и использования суммы этих индексов в качестве одной переменной;
- b) используя индекс осадков в качестве дополнительной переменной.

Осадки, выпавшие после начала снеготаяния, должны включаться в расчетные соотношения по мере их выпадения. Это дает гарантию того, что эффект влияния таких осадков будет учтен при использовании выведенных статистических соотношений для прогноза талого стока.

Следующая формула может использоваться для расчета средневзвешенного индекса накопления  $I_n$ , когда имеются достаточно детальные изменения, охватывающие все высотные зоны бассейна:

$$I_n = \frac{A_1}{A} w_{n_1} + \frac{A_2}{A} w_{n_2} + \dots + \frac{A_N}{A} w_{n_N}, \quad (45.1)$$

где  $w_{n_1}, w_{n_2}, \dots, w_{n_N}$  — средние величины осадков или запасов воды в снежном покрове на различных высотах;  $A_1, A_2, \dots, A_N$  — площади этих высотных зон;  $A$  — общая площадь бассейна.

Снегомерные съемки в горах проводятся несколько раз в течение зимы, чтобы следить за ходом снегонакопления. Последняя снегосъемка обычно проводится в конце периода снегонакопления, как раз перед началом весеннего снеготаяния. Данные снегосъемки в конце периода снегонакопления используются для определения индекса снегонакопления.

Снегомерные маршруты на различных высотах используются для получения данных с целью установления взаимосвязи между запасом воды в снежном покрове и высотой  $w = f(z)$ . Каждый год устанавливается различная зависимость. Когда данные наблюдений являются неполными для построения графиков  $w = f(z)$ , можно применить множественную корреляцию между стоком и запасом воды в снежном покрове, используя данные по каждой точке наблюдений. В этом случае веса каждого снегомерного маршрута принимаются пропорциональными коэффициентам регрессии, а их сумма — равной единице:

$$I_n = a_1 w_{n_1} + a_2 w_{n_2} + \dots + a_N w_{n_N} \quad (45.2)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_N$  — веса;  $w_{n_1}, w_{n_2}, \dots, w_{n_N}$  — значения запасов воды в снежном покрове.

В большинстве случаев наиболее надежный индекс стокообразующей части запасов воды в снеге для горных территорий можно получить при совместном использовании осадкомерных данных и данных снегосъемок с помощью построения графических связей или применения статистических подходов.

#### 45.3.2 Концептуальные модели

Термин «концептуальная модель» используется применительно к любой физически обоснованной модели в противоположность тем моделям, которые являются чисто статистическими.

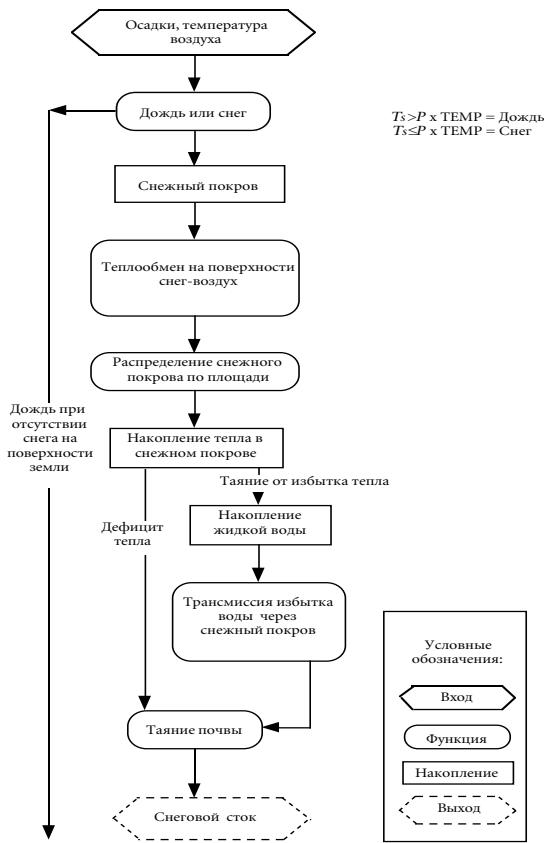
Во многих моделях используются различные типы индекса температур (метод градусо-день) с помощью которого определяются как периоды, когда происходит снеготаяние, так и величины ставшего снега за определенные периоды времени. В моделях аккумуляции и абляции снежного покрова накопление снега определяется по температуре воздуха и осадкам, и кроме того, температура воздуха служит единственным индексом теплообмена на границе раздела снег—воздух. Это идет вразрез с методом градусо-дней, в котором температура воздуха является индексом оттока воды из снежного покрова. В методе градусо-дней в явном виде не учитываются те процессы, которые регулируют водоотдачу из снежного покрова (т. е. замерзание растаявшей воды при недостатке тепла и различные фазы перехода воды в жидкое состояние), в отличие от процесса таяния снега. На рисунке, приведенном ниже, приводится блок-схема модели аккумуляции и абляции снежного покрова, разработанной Андерсоном [7]. Фактические измерения характеристик снежного покрова по данным снегосъемок или точечных наблюдений могут использоваться как дополнительный источник информации для улучшения прогнозов сезонного стока, полученных по концептуальным моделям, в которых в качестве входных данных используются только температура воздуха и осадки [4].

#### 45.3.3 Расширенный прогноз речного стока

Концептуальные модели могут лишь имитировать процесс формирования талого стока за период, для которого имеются входные данные. Прогнозы же на будущее можно составить, используя прогнозируемые величины осадков и температуры воздуха.

Ход стока за сезон не может удовлетворительно прогнозироваться без учета влияния будущих погодных условий.

В прогнозах стока, основанных на методе индексов или статистических методах, будущие условия погоды могут быть оценены с использованием индексов



Блок-схема модели аккумуляции и аблляции снежного покрова

за оставшийся сезон на основе данных наблюдений за осадками и температурой прошлых лет. При использовании концептуальных моделей генерируются последовательности величин стока для условий каждого года на основании климатологических данных за много лет, обычно за 20 лет и более (раздел 43.11). На основании этих последовательностей могут быть построены кривые распределения вероятностей, которые используются для любых характерных периодов времени в будущем и любой расчетной гидрологической характеристики, например: максимального расхода, объема стока и расхода с единицы площади [5]. При этом предполагается, что полученные исторические последовательности являются представительными для тех условий, которые можно ожидать в будущем.

#### 45.3.4 *Входные данные*

Входными данными, используемыми в физически обоснованных или индексного типа концептуальных моделях, могут быть измеренные осадки и (или) данные измерений запасов воды в снежном покрове.

При использовании физически обоснованных концептуальных моделей необходимо вводить поправки на систематические погрешности (раздел 7.3.6), возникающие при измерениях осадков, для того чтобы входные данные, насколько это возможно, адекватно характеризовали средние величины осадков и/или снежного покрова. В горных районах, где характеристики снежного покрова сильно зависят от высоты, данные наблюдений на метеостанциях часто подвержены влиянию местных экспозиций и должны контролироваться и корректироваться с целью их лучшего соответствия средним метеорологическим условиям, если они используются для моделирования условий формирования снежного покрова. На практике измерения снежного покрова и осадков дополняют друг друга.

#### 45.4 *Кратко- и среднесрочные прогнозы талого стока*

Один из методов [6], используемых для разработки кратко- и среднесрочных прогнозов талого стока для крупных речных бассейнов, можно представить в виде следующих блоков:

- a) площадь равнинного речного бассейна разбивается на части (малые бассейны, предположительно однородные по гидрометеорологическим условиям) с площадями по 15 000 км<sup>2</sup>, а речная система разделяется на участки, начиная с верховьев реки;
- b) горные бассейны разделяются на отдельные высотные зоны. Количество зон зависит от перепада высот между истоком и устьем речной системы, а также от изменения гидрометеорологических условий с высотой. По опыту ряда гидрологов известно, что оптимальная разница высот для выделения таких зон составляет от 200 до 400 метров с числом зон около 20 для одного бассейна;
- c) модели калибруются по гидрометеорологическим данным за предшествующие годы;
- d) составляются прогнозы стока для каждого малого бассейна (или высотной зоны для горных районов), начиная с верхних участков вниз по течению до замыкающего створа прогнозирования (глава 34).

#### 45.5 *Долгосрочные прогнозы талого стока*

Разработка метода долгосрочного прогнозирования стока весеннего половодья заключается в установлении соответствующих водно-балансовых соотношений. Установлению этих соотношений должны предшествовать следующие действия:

- a) определение соответствующих характеристик речного бассейна, таких, как рельеф, залесенность и заболоченность, виды почв;
- b) определение различных факторов, характеризующих водопоглотительную способность почвы и задержание воды на поверхности водосбора;
- c) определение основных факторов, обуславливающих потери воды в речном бассейне и их изменчивость от года к году;
- d) определение роли осадков, выпадающих после начала таяния снега, в формировании стока и их многолетней изменчивости;
- e) оценка точности данных о стоке, запасах воды в снежном покрове и осадках.

Приемы долгосрочного прогнозирования талого стока могут основываться на методах индексов (раздел 45.3.1) или более физически обоснованных концептуальных моделях (раздел 45.3.2). Выбор метода зависит от физико-географических характеристик бассейна и наличия данных, пригодных для оперативного использования (раздел 45.2). Прогнозы стока весеннего половодья могут быть улучшены, а их заблаговременность увеличена путем использования статистически проанализированных репрезентативных данных и/или данных метеорологических прогнозов на предстоящий период снеготаяния.

#### 45.6 Прогнозы сезонного талого стока в равнинных районах

Зависимость между суммарным талым стоком  $Q_n$  и запасом воды в снежном покрове для равнинных территорий можно выразить следующим уравнением [7]:

$$Q_n = (w_n - f) \int_0^{w_{n-f}} f(y_d) dy_d - \int_0^{w_{n-f}} y_d f(y_d) dy_d, \quad (45.3)$$

где  $w_n$  — запас воды в снежном покрове;  $f$  — суммарная инфильтрация за период снеготаяния (обе величины выражаются в миллиметрах);  $f(y_d)$  — функция распределения действующей площади в зависимости от слоя воды ( $y_d$ ), необходимого для заполнения емкостей на поверхности речного бассейна.

При отсутствии инфильтрации или в случае, когда ее интенсивность заведомо больше интенсивности снеготаяния, уравнение (45.3) упрощается

$$Q_n = w_n \int_0^{w_n} f(y_d) dy_d - \int_0^{w_n} y_d f(y_d) dy_d. \quad (45.4)$$

В этом случае сток становится функцией запаса воды в снежном покрове и водопоглотительной способности бассейна.

Общее количество воды, участвующей в формировании стока в период весеннего снеготаяния, рассчитывается для каждого года в виде суммы

$$W = \bar{w}_n + \bar{P}, \quad (45.5)$$

где  $\bar{W}_n$  — средний для бассейна запас воды в снежном покрове в конце зимы,  $P$  — средняя величина осадков за период стока; обе величины выражены в миллиметрах.

Средний для бассейна запас воды в снежном покрове можно рассчитать либо как среднее арифметическое, либо как среднее взвешенное значение. Способ среднего арифметического используется, когда пунктов наблюдений за снежным покровом достаточно много, и они равномерно распределены по площади. Способ среднего взвешенного используется, когда пункты наблюдений неравномерно распределены по площади бассейна и/или когда распределение снежного покрова неоднородно. Для расчета среднего взвешенного значения запаса воды в снежном покрове предварительно строится карта его среднего распределения по площади.

В тех районах, где зимой могут наблюдаться оттепели, на поверхности почвы часто образуется ледяная корка. При наличии соответствующих измерений количество воды, содержащейся в такой корке, должно прибавляться к величине запаса воды в снежном покрове.

Очень часто непосредственное определение условий увлажнения почвы для всего бассейна реки, особенно в зимний период, оказывается невозможным из-за отсутствия соответствующих данных. Это главная причина использования косвенных индексов.

В сухих степных районах разница между осадками и суммарным испарением характеризует потенциальную скорость инфильтрации. Во влажной лесной зоне, где в осенний период из года в год содержание влаги в почве равно или больше полевой влагоемкости, эта разность характеризует изменения запаса воды в бассейне в целом. Сток за счет поздних осенних осадков можно также использовать в качестве показателя водоудерживающей способности речных бассейнов в этих районах.

#### **45.7 Прогнозы сезонного талого стока в горных районах**

Вследствие существенного перепада высот в горных районах наблюдаются значительные различия климатических, почвенных и ботанических условий. Эти особенности определяют характер формирования талого стока и водный режим рек. Поэтому важнейшей характеристикой горного бассейна является распределение его территории по высоте. Главными источниками стока являются сезонный снежный покров, который аккумулируется в горах в течение холодного сезона и осадки, выпадающие в течение теплого сезона.

Большая разница во времени между началом и концом снеготаяния создает возможность для долгосрочного прогнозирования сезонного стока горных рек. Наиболее благоприятные условия для таких прогнозов имеются там, где главным источником стока является сезонный снег, а количество летних осадков сравнительно невелико.

Крутые склоны, скальные породы и широкое распространение легко проницаемого крупнообломочного материала в горных бассейнах создают условия, при которых стекание воды в русла рек происходит преимущественно в толщах отложений и по трещинам горных пород. В этих условиях величина потерь стока не может сильно изменяться от года к году, и должна существовать хорошая зависимость между сезонным стоком и запасами снега в бассейне. Такая зависимость может быть установлена эмпирическим путем, если имеются данные наблюдений за ряд лет. Однако на практике установить такую зависимость зачастую весьма затруднительно.

### Список литературы

1. Апполов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. *Курс гидрологического прогнозирования*. Л., Гидрометеоиздат, 1974, с. 418
2. Боровикова Л. Н., Денисов Ю. М., Трофимова Е. Б., Шенкис И. Д. Математическое моделирование процесса стока горных рек. — *Tr. СредАЗНИГМИ*, 1972, вып. 61(76).
3. Жидиков А. П., Левин А. Г., Нечаева Н. С., Попов Е. Г. Модели формирования весеннего стока и проблемы их применения для прогноза гидрографа половодья. — *Tr. Гидрометцентра*, 1972, вып. 81, с. 33–45.
4. Todini, E. and Wallis, J. R., 1978: *A Real-time Rainfall Runoff Model for an On-line Flood Warning System*. AGU Chapman conference on applications of kalman filtering theory and techniques to hydrology, hydraulics and water resources, Pittsburgh, Pennsylvania, 22–24 May 1978.
5. Tweddle, T. M., Schaake, J. C. and Peck, E. L., 1977: National Weather Service extended streamflow prediction. *Proceedings of the western snow conference*, Albuquerque, New Mexico, 19–21 April 1977.
6. Bergstroem, S., 1976: *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*. SMHI Rapporter No. RH07, Hydrological Oceanography.
7. Anderson, E. A., 1973: *National Weather Service River Forecast System: Snow Accumulation and Ablation Model, Programs and Test Data*. NOAA NWS-HYDRO Technical Memorandum 17.



## ГЛАВА 46

### ПРОГНОЗЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ВСКРЫТИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

#### 46.1       **Общие положения**

Многие реки и озера умеренных широт замерзают в зимний период. Наиболее важными фазами ледового режима, для которых составляются прогнозы, являются:

- a) первое появление льда;
- b) формирование сплошного ледяного покрова;
- c) вскрытие сплошного ледяного покрова;
- d) полное очищение от льда.

Ледовый режим рек тесно связан с погодными условиями. Таким образом, сроки появления плавучего льда и даты формирования и вскрытия ледяного покрова меняются от года к году в широком диапазоне. Ледовые прогнозы имеют большую практическую ценность для судоходства. Однако многие другие потребители также заинтересованы в этих прогнозах.

Имеются надежные соотношения для расчета термического и ледового режима водных объектов, но их применение к прогнозированию ледовых явлений существенно ограничено из-за стохастической природы параметров, используемых в уравнениях, которые изменяются за время между выпуском прогноза и предсказанным явлением. В данной главе рассматриваются различные виды прогнозов ледового режима водных объектов.

#### 46.2       **Прогнозы формирования льда**

Формирование льда на реке начинается с того момента, когда поверхностный слой воды охлаждается до  $0^{\circ}\text{C}$ . В более глубоком слое потока температура в этот момент обычно остается выше  $0^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, прогнозирование даты появления льда сводится к расчету теплообмена в поверхностном слое воды для установления даты, когда этот слой охладится до  $0^{\circ}\text{C}$ .

Прогнозирование температуры воды следует проводить путем последовательного решения уравнения теплового баланса с учетом переменных, вызывающих потерю тепла. Потеря тепла поверхностью воды является функцией температуры воздуха, скорости ветра и турбулентного обмена водной массы. В наиболее общей форме уравнения теплового баланса на границе раздела вода—воздух за определенный интервал времени имеет следующий вид:

$$\alpha (\bar{\theta}_w - \theta_{sw}) + Q = 0, \quad (46.1)$$

где  $\bar{\theta}_w$  — средняя температура водной массы потока;  $\theta_{sw}$  — температура поверхности воды;  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи от водной массы к поверхности раздела вода-воздух;  $Q$  — потеря тепла поверхностью воды.

Аналогичный метод [5] основан на неравенстве между двумя потоками тепла:

$$a_n T_{wn} \leq -Q_m^* \text{ или } T_{wn} \leq -\frac{Q_m^*}{a_n}, \quad (46.2)$$

где  $T_w$  — средняя температура водного потока;  $\alpha$  — коэффициент теплоемкости водного объекта;  $Q^*$  — потеря тепла через границу раздела вода—воздух;  $n$  — период, когда это неравенство имеет место. Расчет  $\alpha$ ,  $T_w$  и  $Q^*$  требует наличия нескольких метеорологических и гидрологических переменных. Этот метод можно использовать, если существуют прогнозы температуры воздуха на несколько дней вперед. Его точность зависит, главным образом, от погрешностей определения ожидаемой температуры воздуха. Оригинальный метод может быть улучшен двумя путями:

- a) можно увеличивать интервал времени при прогнозировании в соответствии с реальным периодом наблюдений (например для 12 часов);
- b) можно учитывать изменения формирования ледяного покрова, скорости течения на участке и его средней глубины.

Необходимыми условиями для начала формирования ледяного покрова являются накопление достаточного количества плавучего льда при интенсивной потере тепла, при которых смерзшиеся льдины выдерживают воздействие, оказываемое текущей водой. Эти условия выражаются эмпирической формулой следующего вида:

$$(Q_a)_c = -6,5v^2 \left( \frac{b}{\sum Q_a} \right)^{0.8} \quad (46.3)$$

где  $(Q_a)_c$  — критическая (максимально возможная) среднесуточная температура воздуха на день замерзания;  $v$  — средняя скорость потока на участке;  $b$  — ширина реки;  $\sum Q_a$  — сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха со дня появления льда [1]. Расчеты производятся по прогнозируемой среднесуточной температуре воздуха последовательно за каждый день до тех пор, пока среднесуточная температура не опустится ниже критической точки  $(Q_a)_c$  рассчитанной по уравнению (46.3). День, когда критическая точка достигнута, рассматривается как прогнозная дата начала ледостава.

Обобщенный подход к долгосрочным прогнозам замерзания и вскрытия льда применяется для рек Северной Европы и Сибири. Этот подход включает в себя:

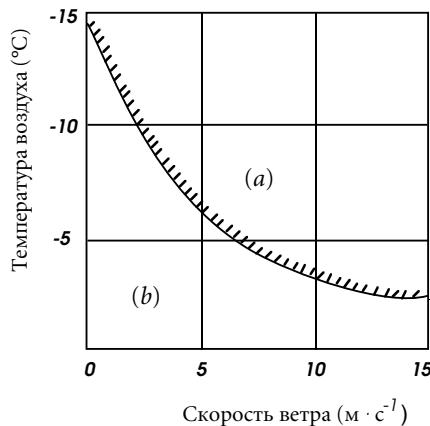
- a) синоптический анализ условий, обуславливающих замерзание, в соответствии с которыми Северное полушарие делится на ряд регионов;

- b) определение значений переменных, характеризующих атмосферные процессы, например путем описания полей метеорологических характеристик ортогональными функциями;
- c) использование множественной корреляции для определения соотношения между временем появления льда и переменными, представляющими поля соответствующих метеорологических характеристик.

Используя этот метод оказалось возможным прогнозировать даты, когда ледяной покров увеличивается от 10 до 15 см и затем до 20 см.

Эмпирические формулы, основанные на имеющихся прогнозах температуры воздуха и скорости ветра, были разработаны с целью предсказания формирования шуги в водохранилищах гидроэлектростанций. Графический пример такой связи приведен на рисунке ниже.

Эксплуатация водохозяйственных сооружений в зимних условиях должна основываться на соответствующих рекомендациях и прогнозах. Можно организовать гидрологическую сеть, ориентированную на получение информации о ледовом режиме, которая может функционировать применительно к требованиям прогнозирования. Необходимо также иметь регулярную обратную связь между водохозяйственными органами и центром прогнозов.



Прогноз формирования шуги: a) шугообразование возможно; и  
b) шугообразование невозможно.

Упрощенная форма уравнений Шуляковского была успешно применена для прогноза ледовых явлений на р. Дунай:

$$(T_w)_n = (T_w)_o e^{-na_o} + \left[ \bar{T}_a + \frac{d}{k} + \frac{(\alpha + h_o) q_b}{\alpha h_o} \right] \left( 1 - e^{-na_o} \right), \quad (46.4)$$

где  $a_o = \frac{\alpha h_o t}{(\alpha + h_o) H c \rho}$ ;  $(T_w)_o$  — начальная температура воды, измеренная в интервале, соответствующем времени прохождения воды через верхнюю часть участка;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена между водной массой и поверхностью воды, который аппроксимируется выражением  $\alpha_n = (1745 \bar{u}_n + 106 \bar{W}_n) 4,1868$ ;  $\bar{u}$  — средняя скорость ветра за прериод  $n$  суток;  $\bar{W}$  — средняя скорость ветра за период  $n$  дней;  $h_o$  — коэффициент теплообмена между поверхностью воды и воздухом;  $H$  — средняя глубина потока на участке;  $d$  — удельный коэффициент теплообмена при температуре, равной температуре поверхности воды;  $\bar{T}_a$  — средняя суточная температура воздуха в течение расчетного периода, °C;  $q_b$  — удельный теплообмен между дном реки и водной массой;  $c$  — удельная теплоемкость воды;  $t$  — интервал времени, используемый в расчетах, сут.

Результирующий теплообмен между водой и воздухом  $Q_m^*$  можно выразить следующей эмпирической формулой:

$$Q_m^* = h_o \bar{T}_a + d. \quad (46.5)$$

Толщина льда может быть предсказана по формуле

$$\Delta h_i = 6,2 \frac{\sum D_{\text{поверхн.}}}{h_i}, \quad (46.6)$$

где  $\Delta h_i$  — приращение толщины льда, см;  $D_{\text{поверхн.}}$  — ожидаемая сумма отрицательных температур поверхности льда, градусо-дни, рассчитанная от даты первого измерения толщины льда до даты, на которую составляется прогноз его толщины;

$$h_i = h_{ii} + \frac{k_{ti}}{k_{ts}} h_s, \quad (46.7)$$

где  $h_{ii}$  — начальная толщина льда, см;  $k_{ti}$  — коэффициент теплопроводности льда;  $k_{ts}$  — коэффициент теплопроводности снега;  $h_s$  — толщина слоя снега на поверхности льда, см.

### 46.3 Прогнозы вскрытия водных объектов

Один из методов прогнозирования даты вскрытия льда основан на оценке критической суммы градусо-дней с положительной температурой воздуха, необходимой для вскрытия льда на исследуемом участке реки. Для того чтобы определить эту сумму, используется соотношение между нею и суммой градусо-дней с отрицательными температурами воздуха за зимний период. Дата вскрытия определяется с помощью критической суммы градусо-дней, вычисленной по графику ( $+ \Sigma^N D_j$ ), и температуры воздуха, ожидаемой на несколько дней вперед. Для рек, вскрытие которых происходит под влиянием интенсивного притока талой воды, эмпирические зависимости следующего вида могут обеспечить результаты, приемлемые для прогноза:

$$+ \sum^N D_j = f(-\sum^N D_j \Delta h), \quad (46.8)$$

где  $\Delta h$  — подъем уровня воды, необходимый для начала процесса вскрытия льда.

#### 46.3.1 Прогнозы вскрытия льда на водохранилищах

Вскрытие ледяного покрова на водохранилище является следствием его таяния и постепенного уменьшения его сплоченности. Под действием ветра лед может разламываться на отдельные льдины различных размеров, которые затем начинают перемещаться по водохранилищу в виде общего дрейфа льда. Условие начала ледохода выражается неравенством следующего вида:

$$\Psi d_g^{1/2} \leq CU^2, \quad (46.9)$$

где  $\Psi$  — сплоченность тающего льда (относительное усиление на изгиб);  $d_g$  — толщина льда, см;  $U$  — максимальная скорость ветра за 24-часовой период,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $C$  — эмпирический коэффициент, который зависит от скорости ветра и постоянен для данного водохранилища. Для ряда водохранилищ СНГ значение коэффициента  $C$  оказалось равным 0,018. Сплошенность льда  $\Psi$  и его толщина  $d_g$  к началу дрейфа рассчитываются по метеорологическим элементам с использованием уравнений теплового баланса. Более подробные сведения по применению этого метода можно найти в работе Булатова *Возможность создания универсального метода расчета времени вскрытия льда на реках* [2].

#### 46.3.2 Прогнозы вскрытия льда на реках

Метод прогнозирования вскрытия льда на реках может основываться на моделях, в которых условие для вскрытия ледяного покрова определяется по толщине и сплоченности льда, а также транспортирующей способности потока. Когда силы сопротивления становятся равными или меньше движущей силы, ледяной покров разрушается и начинается ледоход.

Условие для вскрытия ледяного покрова выражается соотношением

$$\Psi d_g \leq f(H, \Delta H), \quad (46.10)$$

где  $\Psi d_g$  — произведение относительного усилия на изгиб на толщину льда есть мера сплоченности ледяного покрова в момент разрушения;  $H$  и  $\Delta H$  — параметры, характеризующие транспортирующую способность потока;  $H$  — высота уровня воды в момент разрушения ледяного покрова (характеризует расход и скорость потока);  $\Delta H$  — подъем воды к моменту вскрытия над минимальным зимним уровнем  $H_3$ , численно равным  $\Delta H = H - H_3$ . Так как  $H$  и  $\Delta H$  взаимосвязаны, то в большинстве случаев достаточно учитывать только одну из этих величин в соотношении (46.10). Эти величины основаны на прогнозе метеоусловий и реальных данных измерений за несколько дней до начала вскрытия льда. Апроксимация этого соотношения может быть представлена в следующем виде:

$$\Psi d_g \leq a + b (\Delta H)^2, \quad (46.11)$$

где  $a$  и  $b$  — эмпирические коэффициенты.

#### 46.4 Долгосрочные ледовые прогнозы

Разработка методов для долгосрочного прогнозирования ледовых явлений обычно включает:

- a) рассмотрение сроков образования и вскрытия льда на реках той территории, которая изучается (средние даты и их многолетняя изменчивость, выделение районов с однородными ледовыми явлениями);
- b) анализ атмосферных процессов, которые вызывают поступление холодных или теплых воздушных масс, приводящих к образованию или вскрытию ледяного покрова;
- c) разработка или использование уже известных в метеорологии механизмов развития во времени атмосферных процессов, что делает возможным предсказание интенсивности похолодания или потепления с большой заблаговременностью.

Изложенные в этом разделе положения рассматриваются на примерах отдельных рек СНГ в работе [3].

##### 46.4.1 *Формирование ледяного покрова*

Наступление холодной погоды и сроки формирования льда на реках Восточной Сибири тесно связаны со сроками начала образования Восточно-Сибирского антициклона и степенью его развития. Например, для сроков наступления холода на р. Лене это соотношение выражается регрессионным уравнением со сроками устойчивого формирования антициклона и разницей в аномалиях приземного атмосферного давления за август месяц между районами, расположенными к западу и востоку от Лены. Прогноз выпускается в начале сентября и охватывает период около полутора месяцев.

На реках центральной части Европейской территории СНГ сроки появления льда связаны с интенсивностью похолодания во второй половине октября и первой половине ноября, т. е. в синоптический сезон, предшествующий зиме. Интенсивность похолодания в этот сезон может быть оценена по степени охлаждения и меридиональному переносу атмосферных масс за вторую декаду сентября. Это соотношение выражается линейной регрессионной зависимостью. Прогноз для средней Волги, выпускаемый в конце сентября, охватывает период около полутора месяцев.

##### 46.4.2 *Разрушение ледяного покрова*

Вскрытие рек Западной Сибири и бассейна р. Камы приходится на вторую половину апреля — начало мая, т. е. на весенний синоптический сезон. Сезон прогнозирования

начинается в марте, так как можно оценить степень потепления за весь сезон, основываясь на характеристиках потепления в этом месяце. Прогноз выпускается в начале апреля, примерно на месяц вперед.

#### 46.4.3 *Использование индекса атмосферной циркуляции*

В последние годы для прогноза формирования и разрушения льда на реках Сибири используется метод, основанный на анализе атмосферных процессов над всем Северным полушарием за три предшествующих месяца. Используется метод главных компонент для определения оптимальных индексов атмосферной циркуляции, связанных с ледовым режимом рек. Прогностические схемы принимают вид уравнений регрессии между собственными векторами, характеризующими эти две системы [4].

#### Список литературы

1. Апполов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. *Курс гидрологических прогнозов*. Л., Гидрометеоиздат, 1974.
2. Булатов С. Н. *О возможности создания универсального метода расчета времени вскрытия рек*. — Отчет Гидрометцентра СССР, 1972, № 112, с.100–107.
3. Ефремов Н. Д., Каракаш Е. С. *Метод долгосрочного прогноза сроков вскрытия рек Лены и Енисея*. — Отчет Гидрометцентра СССР, 1977, № 186, с. 78–87.
4. Мещерская А. В. и др. *Естественные компоненты метеорологических полей*. Л., Гидрометеоиздат, 1970.
5. Шуляковский Л. Г. *Формирование льда и начало замерзания на реках, озерах и водохранилищах: расчеты для целей прогнозирования*. Л., Гидрометеоиздат, 1960.



# ЧАСТЬ F

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИИ В ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

### ГЛАВА 47

#### ВВЕДЕНИЕ К ПРИМЕНЕНИЮ ГИДРОЛОГИИ В ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

##### 47.1        **Общие положения**

Цель данной части *Руководства* — дать рекомендации по применению методов гидрологического анализа, описанных в частях D и E, при проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов. Ряд экономических, социальных, инженерных и других аспектов также требует рассмотрения в практике составления водохозяйственных проектов [1, 2].

##### 47.2        **Цели водохозяйственного проекта**

В обычной водохозяйственной схеме речного бассейна весь сток, который можно зарегулировать, полностью используется. Имеющиеся водные ресурсы распределяются между потребителями в соответствии с системой приоритетов. Потребности высшего приоритета удовлетворяются, по возможности всегда, в то время как другие только тогда, когда имеется достаточное количество воды. Водохозяйственные проекты обычно направлены на решение следующих задач:

- a) судоходство;
- b) орошение;
- c) производство электроэнергии;
- d) регулирование паводков;
- e) коммунальное водоснабжение;
- f) уменьшение загрязнения вод;
- g) использование воды на промышленные нужды;
- h) рекреационное, эстетическое и традиционное использование вод;
- i) охрана рыб, дикой природы и другие экологические аспекты;
- j) регулирование засоления и заиления;
- k) пополнение запасов подземных вод.

Критерии, используемые при проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов, обычно основаны на получении максимальной экономической эффективности от вложенных ресурсов. Проект, отвечающий всем запросам, не всегда будет самым выгодным вариантом. Поскольку капиталовложения на создание запаса воды растут с ростом объема накапливаемой воды, то в некоторой точке можно достигнуть превышения затрат над теми убытками, которые связаны

с недостаточной подачей воды. Могут возникать также различные конфликты морального аспекта: с одной стороны, создается запас воды для удовлетворения запросов, а с другой стороны, урезаются требования на воду. Вот почему целью регулирования водных ресурсов является определение оптимального баланса между противоречивыми тенденциями на основе оценки экономической эффективности и других соображений.

#### 47.3        **Многоцелевые проекты**

С ростом уровня использования водных ресурсов во всем мире, становится все более важным планировать проекты, которые могут удовлетворять одновременно несколько целей. Например, проектируемое водохранилище может одновременно обеспечивать как водоснабжение, так и регулирование паводков ниже по течению реки. Гидрологические данные, необходимые для разработки многоцелевого проекта, представляют собой совокупность данных, необходимых для реализации каждой отдельной цели. Методы анализа, хотя и подобны тем, которые применяются при разработке одноцелевых проектов, являются более сложными. Для разработки оптимального варианта проекта необходимо рассмотреть различные комбинации размеров сооружаемых объектов и режимов их эксплуатации.

Основное противоречие при управлении водными ресурсами с целью регулирования паводков и накопления запасов воды (снабжение и регулирование низкого стока) возникает при разработке многоцелевых проектов. В паводочный сезон весьма важным является поддержание свободной емкости водохранилища в преддверии возможного поступления паводочных вод, в то время как обычно желательно держать водохранилище полностью наполненным в целях регулирования низкого стока. В конце каждого паводочного сезона это противоречие становится решающим, поскольку дальнейшее преимущество от сохранения воды в водохранилище будет зависеть, отчасти, от запасов воды в нем и поэтому особенно важно контролировать планы работы водохранилища в связи с ожидаемыми паводками и низким стоком.

#### 47.4        **Системы водных ресурсов**

В том случае, если в речном бассейне осуществляются более одного водохозяйственного проекта или если вода перераспределяется между бассейнами, для которых такие проекты существуют, их общую эффективность можно повысить за счет скоординированного управлением проектами. Такая координация требует, чтобы все разнообразные проекты рассматривались как одна взаимосвязанная система, в которой учитываются имеющиеся запасы воды и конкретные цели каждого проекта, а также взаимное влияние и связи между ними. Изучение условий эксплуатации существующей системы должно предприниматься сразу же, как только появляется новый проект или возникают новые требования, которые могут иметь значительное влияние на уже установленный эксплуатационный режим.

47.5

## Предварительные исследования в целях водохозяйственного проектирования

Прежде чем тратить время и значительные средства на разработку водохозяйственного проекта, необходимо провести предварительное исследование выполнимости, целесообразности, масштабности проекта и его возможного влияния на те гидрологические факторы, которые воздействуют на окружающую среду и эффективность других проектов. Хотя это исследование приходится проводить на любых доступных материалах, например: на отрывочных гидрологических данных, наблюдениях, старых картах и отчетах, — оно должно осуществляться с большой тщательностью, т. к. это именно та стадия, на которой часто принимаются принципиальные проектные решения, а также могут выявиться важные аспекты и последствия осуществления проекта. В том случае, когда предварительные исследования указывают на то, что проект потенциально выгоден, можно переходить к более детальным исследованиям. Виды гидрологических данных, необходимых для водного хозяйства, приводятся в представленной ниже таблице.

### Данные, необходимые для водохозяйственной деятельности

<i>Назначение</i>	<i>Сфера применения</i>	<i>Рассматриваемый элемент</i>	<i>Требуемые данные</i>
Рекогносцировка на месте	Гидрография		<ul style="list-style-type: none"> <li>— Русловая сеть</li> <li>— Водосборы</li> <li>— Родники</li> <li>— Особенности рек с постоянным, прерывистым и временным стоком</li> </ul>
		Физическая география	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Геология</li> <li>— Топография и морфология</li> <li>— Почвенный покров и типы почв</li> <li>— Урбанизация</li> </ul>
	Метеорология		<ul style="list-style-type: none"> <li>— Общие данные: 10, 11*</li> <li>— Распределение температур</li> <li>— Распределение ветра</li> <li>— Распределение снежного покрова</li> </ul>
		Речной сток	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Общие данные по отдельным створам: 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9</li> <li>— Общие данные: 4, 5, 6</li> </ul>
	Паводки		
Судоходство	Каналы и русла рек	Глубина воды	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Зависимость глубина—расход для важных створов</li> <li>— Общие данные: 2, 3, 7, 8</li> </ul>

\* Эти цифры соответствуют номерам пунктов в списке общих гидрологических данных, который приводится в конце таблицы.

(продолжение)

		Сток в период паводков и половодий	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Общие данные: 4, 6</li> <li>— Скорости течения при высоких уровнях воды</li> <li>— Время добегания паводочной волны на различных участках потока</li> <li>— Время запаздывания между выпадением осадков и подъемом уровня воды</li> <li>— Распределение снеготаяния</li> </ul>
Орошение	Требования водопользователей	Осадки Суммарное испарение  Влажность почвы	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Общие данные: 10</li> <li>— Общие данные: 11</li> <li>— Транспирация</li> <li>— Тип почвы</li> <li>— Уровень грунтовых вод</li> </ul>
	Водоснабжение	Речной сток Водохранилище	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9</li> <li>— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11</li> </ul>
Производство электроэнергии	Высоконапорные водохранилища Низконапорные плотины	Речной сток Речной сток	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11</li> <li>— Общие данные: 2, 3, 4, 6, 7, 8</li> <li>— Зависимость глубина воды—расход воды в нижнем створе</li> </ul>
Регулирование паводков	Сооружения	Уровень воды	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Зависимость: глубина воды—расход воды для важных створов</li> <li>— Гидравлико-топографические связи для поймы</li> <li>— Общие данные: 4, 5, 6, 8</li> <li>— Площадь затопления поймы</li> <li>— Статистические характеристики интенсивных дождей на всей рассматриваемой территории</li> <li>— Совместные данные о паводках и вызвавших их осадках</li> </ul>
		Осадки	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Время прохождения паводка</li> <li>— Время запаздывания стока относительно осадков</li> <li>— Последовательность прохождения паводка на различных протоках</li> <li>— Время подъема паводка</li> <li>— Временные ряды паводков</li> <li>— Временные ряды ливневых осадков</li> <li>— Частота охвата площади паводком</li> <li>— Размыв и отложение наносов в период паводка</li> </ul>
Предупреждения о паводках		Прогноз  Предсказание	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Время прохождения паводка</li> <li>— Время запаздывания стока относительно осадков</li> <li>— Последовательность прохождения паводка на различных протоках</li> <li>— Время подъема паводка</li> <li>— Временные ряды паводков</li> <li>— Временные ряды ливневых осадков</li> <li>— Частота охвата площади паводком</li> <li>— Размыв и отложение наносов в период паводка</li> </ul>
Зоны влияния паводков и страховка		Степень влияния паводка	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Время прохождения паводка</li> <li>— Время запаздывания стока относительно осадков</li> <li>— Последовательность прохождения паводка на различных протоках</li> <li>— Время подъема паводка</li> <li>— Временные ряды паводков</li> <li>— Временные ряды ливневых осадков</li> <li>— Частота охвата площади паводком</li> <li>— Размыв и отложение наносов в период паводка</li> </ul>
Городское водоснабжение	Реки Водохранилища	Речной сток и весеннее половодье Речной сток	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9</li> <li>— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11</li> </ul>

(продолжение)

Снижение загрязнения	Разбавление	Речной сток	— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9
	Очистка	Паводки Водохранилища	— Общие данные: 4, 6, 9 — Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11
Промышленное водопользование	Реки	Речной сток	— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9
	Водохранилища	Речной сток	— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11
Рекреационное, эстетическое и традиционное использование водных объектов	Озера и водохранилища	Физическая география	— Связь уровень—объем — Особенности береговой линии — Волнение — Общие данные: 9
			Климат
			— Общие данные: 7, 10, 11 — Распределение температуры воздуха — Распределение ветра
	Реки	Речной сток	— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
		Физическая география	— Геометрия русла — Связь глубина—расход—скорость течения — Почва и растительный покров береговых участков
			— Общие данные: 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 — Колебания попусков воды из водохранилища
	Охрана флоры и фауны	Речной сток	— Общие данные: 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, — Колебания уровня воды — Общие данные: 9
		Сооружения	— Изменения глубины, скорости течения, температуры воды, количества наносов и береговые деформации в верхнем и нижнем бьефах под влиянием сооружений
			— Изменения глубины, скорости течения, температуры воды, количества наносов и береговые деформации в верхнем и нижнем бьефах под влиянием сооружений
Регулирование солености и содержания наносов	Разбавление	Речной сток	— Общие данные: 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9
	Очистка	Паводки	— Общие данные: 4, 6, 8, 9
		Водохранилища	— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11
Пополнение грунтовых вод	Водохранилища и пруды	Речной сток	— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
	Береговая фильтрация	Речной сток	— Общие данные: 3, 4, 6, 7, 8, 9
	Колодцы	Речной сток	— Общие данные: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11

1. Ряды ежемесячных и годовых объемов стока.
2. Ряды ежедневных расходов.
3. Кривые обеспеченности низкого стока.
4. Кривые обеспеченности максимальных расходов.
5. Кривые обеспеченности объемов стока за паводок.
6. Формы типовых гидрографов паводков.
7. Сведения о ледовом покрове.
8. Перенос наносов.
9. Качество воды.
10. Распределение осадков во времени и пространстве.
11. Распределение испарения во времени и пространстве.

#### **Список литературы**

1. Linsley, R. K. and Franzini, J. B., 1972: *Water Resources Engineering*. McGraw-Hill, New York.
2. Maass, A., et al., 1962: *Design of Water Resources Systems*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

## ГЛАВА 48

# УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

### 48.1       **Общие положения**

В последние два десятилетия стало очевидным растущее понимание того, что природные ресурсы ограничены, и в будущем с этим необходимо считаться. Концепция устойчивого развития становится общепринятой. Эта концепция понимается разными людьми по-разному, однако здесь мы используем определение, принятое Международным союзом охраны природы и природных ресурсов, Программой Объединенных Наций по окружающей среде и Всемирным фондом природы [2]: «Устойчивое развитие — есть улучшение качества жизни человека в рамках существующих возможностей сохранения и поддержания экологических систем».

Важным является вопрос о том, существует ли какой-либо способ определения степени устойчивости такого развития. Можно утверждать, что если принять во внимание естественную изменчивость и тенденции, связанные с наличием водных ресурсов, то результаты развития будут напрямую связаны с изменениями в ресурсной базе. Мониторинг количества и качества воды в природных системах — реках, озерах, подземных водах, снеге, льде — становится, таким образом, необходимым условием для определения того предела, до которого такое развитие может быть устойчивым.

Создание адекватных баз данных по результатам мониторинга гидрологических систем является фундаментальным условием для оценки водных ресурсов и их эксплуатации. Целью данной главы является рассмотрение вопроса соответствия нынешней сети мониторинга водных ресурсов и используемых методов современным требованиям в свете меняющейся ресурсной базы и философии подходов к управлению водным хозяйством, учитывая его устойчивое развитие.

### 48.2       **Меняющийся характер ресурсов**

#### 48.2.1      **Естественные изменения**

Под воздействием метеорологических условий гидрологическая система постоянно меняется. На протяжении длительных периодов времени — от десятилетий до тысячелетий — изменения в поступлении солнечной энергии через атмосферу приводят к важным изменениям в гидрологическом режиме водных объектов. Например, изменения в распространении и протяженности ледовых массивов и растительного покрова обычно приводят к изменениям гидрологических характеристик.

В последнее время установлено, что взаимодействие в системе атмосфера-океан чрезвычайно важно с точки зрения климата. Явление Эль-Ниньо, охватывающее большие площади, может иметь далеко идущие гидрологические последствия, приобретающие особую важность, когда они ассоциируются с засухами и наводнениями.

Природные явления совсем другого типа, такие, как сильные вулканические извержения с выбросом в атмосферу большого количества пыли и газов, также могут сильно влиять на гидрологическую систему.

#### 48.2.2 *Изменения, вызванные человеком*

Деятельность человека оказывает все большее влияние на гидрологические системы. К наиболее важным видам деятельности можно отнести следующие:

- a) строительство плотин и переброски стока, оказывающие основное влияние на режим стока и перенос наносов на многих реках мира;
- b) изменения в землепользовании, часто оказывающие влияние на гидрологический режим:
  - i) обезлесение, часто приводящее к резкому росту пиков паводков и увеличению почвенной эрозии;
  - ii) осушение переувлажненных земель, часто приводящее к изменению режима стока;
  - iii) фермерство, приводящее к изменению скорости инфильтрации и питания подземных вод;
  - iv) урбанизация, увеличивающая интенсивность стекания;
- c) промышленные и городские сбросы сточных вод, а также применяемые в сельском хозяйстве удобрения, пестициды и пр. оказывают неблагоприятное влияние на качество воды на многих участках рек;
- d) выбросы в атмосферу газов, вызывающих парниковый эффект, приведут в следующем веке к изменению климата и могут повлиять на гидрологические системы.

Для того чтобы лучше понять гидрологическую систему, чтобы предсказать и эффективно использовать водные ресурсы в будущем, системы мониторинга должны фиксировать эти многочисленные изменения.

#### 48.3 *Меняющиеся подходы к управлению водным хозяйством*

Во многих частях мира произошли значительные социально-экономические изменения. Быстрый рост населения, в частности во многих развивающихся странах и особенно в растущих городских центрах в сочетании с индустриализацией и повышением жизненного уровня, увеличили потребности в воде. Загрязнение воды во многих регионах привело к сокращению количества воды, пригодной к употреблению. В будущем растущие потребности в воде

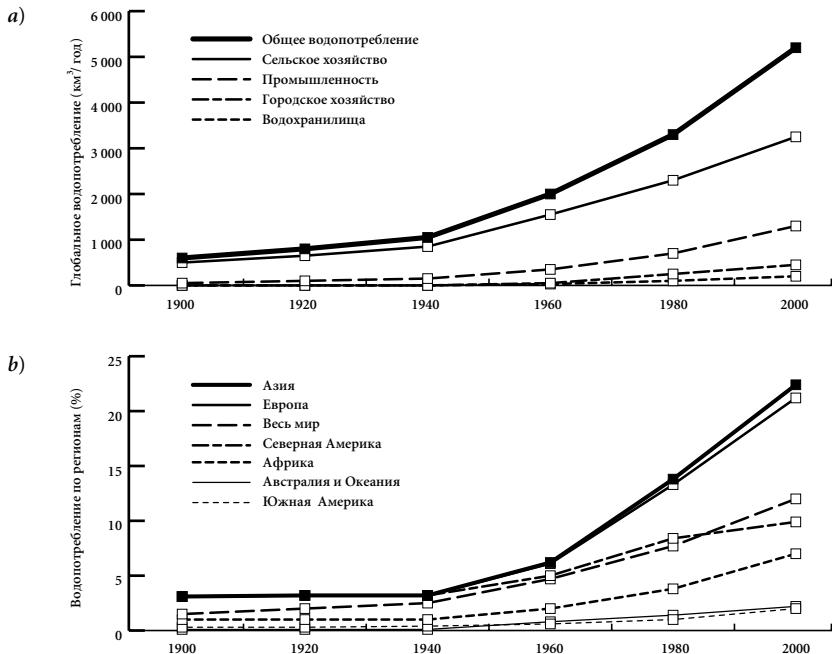
будут, как правило, превышать имеющееся в наличии количество воды, годной к потреблению. Таким образом, совершенно необходимо более рациональное и эффективное управление водным хозяйством.

За последние два десятилетия в управлении водным хозяйством произошли очень серьезные изменения. Этому способствовали два весьма важных обстоятельства. Во-первых, растущее понимание того, что вода — основополагающий элемент окружающей среды. Присутствие воды и ее движение во всех биологических системах есть основа жизни. Вода, земля и биологические системы должны рассматриваться во взаимосвязи, и мониторинг различных компонентов экосистем должен быть гармоничным. Во-вторых, понимание того, что вода абсолютно необходима во всех видах экономической деятельности. Вода необходима для сельского хозяйства и пищевой промышленности, для производства многих видов промышленной продукции и энергии. Вода оказывает решающее влияние на здоровье человека. Большие излишки воды (паводки) или ее недостаток (засухи) могут привести к людским бедствиям и ущербу окружающей среде.

На рисунке внизу (часть *a*) показана эволюция потребления воды в мире с 1900 по 2000 гг. В глобальном масштабе потребление воды возросло в 10 раз, и к 2000 г. почти половина всех запасов воды будет использоваться. Сельское хозяйство и, особенно, ирригация остаются главными потребителями, несмотря на то что в процентном отношении доля используемой ими воды непрерывно уменьшается — с 90,5 % в 1900 г. до 62,6 % к 2000 году. За тот же период количество воды, потребляемое промышленностью, возрастет с 6,4 % до 24,7 %; в городах наблюдаются такие же темпы роста потребления воды — с 2,8 % в 1900 г. до 8,5 % к 2000 г.

Каково же потребление воды в каждом крупном регионе мира в течение двадцатого века по сравнению с имеющимися запасами воды? Ответ на этот вопрос (в процентном отношении) дает нижний рисунок (часть *b*), составленный на основании расчета теоретических ресурсов, т. е. запаса воды в реках. Согласно этим расчетам очевидно, что в Европе и Азии потребление водных ресурсов более высокое, чем в Северной Америке, Африке и, особенно, в Южной Америке и Австралии—Океании. Ясно также, что наиболее интенсивно растет потребление воды в Европе и Азии, исключая Южную Америку, где увеличение потребления воды возмещается огромными ее запасами.

Растущее понимание всеобъемлющей природы воды и ее важности для окружающей среды и деятельности человека выявило необходимость в системном подходе к рациональному потреблению водных ресурсов. Использование ресурсов на нужды человека может оказывать вредное влияние на окружающую среду, в то время как изменение в запасах природных ресурсов может ограничивать или, иначе, сдерживать деятельность человека. Такие изменения требуют комплексного подхода к управлению водным хозяйством.



Развитие водопотребления в мире по секторам *a)* и регионам *b)*

#### 48.3.1 Управление водосбором

Общепризнано, что природной единицей, с точки зрения управления водными ресурсами, является бассейн реки. Целесообразно использовать водные ресурсы в пределах речного бассейна комплексно, поскольку вода, часто, неоднократно потребляется по мере ее движения от истока к устью. Разумно также координированно использовать в пределах бассейна все природные ресурсы — растительность, почвы и т. д. Потребности в воде для нужд человека также должны удовлетворяться в пределах бассейна на основании комплексного подхода.

К сожалению, политические границы обычно не совпадают с границами водных бассейнов. Реки часто пересекают межгосударственные границы, а в пределах одной страны — границы между отдельными административными территориями. В глобальном масштабе примерно половина поверхности Земли занята речными бассейнами, являющимися межгосударственными, и более 200 бассейнов имеют международный характер.

#### 48.3.2 *Раздробленное управление*

Широко распространено такое положение, когда в отдельном административном районе или стране различными аспектами эксплуатации водных ресурсов руководят несколько различных агентств или учреждений. Департаменты или министерства сельского хозяйства, энергетики, промышленности и здравоохранения часто имеют противоположные требования к управлению водным хозяйством. Обычным является и то, что относительно новые департаменты по охране окружающей среды стараются по-своему определить свои полномочия и вступают в борьбу друг с другом по вопросам юрисдикции и своих прав в сфере сохранения или контроля за загрязнением окружающей среды.

Очень часто сеть станций по проведению мониторинга в пределах страны или административной территории оказывается раздробленной как политически, так и организационно. Даже внутри отдельных агентств обязанности в отношении количества и качества воды часто не скординированы. Организационная путаница в вопросах ответственности и полномочий в разных странах и вступающие в противоречия требования разных стран на пользование водой (в пределах межгосударственных бассейнов) представляют собой серьезные проблемы при учреждении и обслуживании эффективных сетей мониторинга.

Система мониторинга должна быть так спроектирована и организована, чтобы она работала стабильно, вопреки быстро меняющимся взглядам руководителей водного хозяйства, меняющимся социально-экономическим условиям и изменениям базовых значений ресурсов.

### 48.4 Информационные программы по водным ресурсам

#### 48.4.1 *Оценочные данные о будущих потребностях в воде*

Отчет Международной конференции по водным ресурсам и окружающей среде (МКВРОС), состоявшейся в Дублине 26–31 января 1992 г. [1], дает всестороннюю оценку важности водных ресурсов для окружающей среды и мировой экономики. В сформулированных в отчете положениях четко определена та роль, которую должны играть гидрологические службы в достижении целей, связанных с устойчивым развитием водного хозяйства. На Конференции были рассмотрены следующие вопросы:

- a) комплексное освоение и рациональное использование водных ресурсов;
- b) оценка водных ресурсов и воздействие изменения климата на водные ресурсы;
- c) охрана водных ресурсов, качества воды и водных экосистем;
- d) водные ресурсы и устойчивое городское развитие, а также снабжение питьевой водой и санитария в городских условиях;
- e) водные ресурсы для устойчивого производства продовольствия и сельского развития, а также снабжение питьевой водой и санитария в сельских условиях;

- f) механизмы осуществления и координации на глобальном, национальном, региональном и локальном уровнях.

Трудно предвидеть, какая информация потребуется для удовлетворения тех нужд, которые связаны с реализацией долгосрочных проектов в будущем. Лучшие идеи, вероятно, можно почерпнуть из рассмотрения последних тенденций в области управления водным хозяйством (раздел 48.3). Поскольку данные предназначены для руководителей водного хозяйства как в частных, так и правительственные агентствах, изменения подходов к управлению водным хозяйством будут менять требования, предъявляемые к данным и информации. Влияние этих изменений может выразиться в следующем:

- a) растущий спрос на воду приведет к удорожанию воды, что вызовет переоценку стоимости различных товаров и услуг в пересчете на водный эквивалент — эти явления в будущем во многих регионах могут быть усилены снижением количества и ухудшением качества имеющихся водных ресурсов;
- b) экономическое давление приведет к более высокой плате за воду, повышению стоимости акций и местного финансирования программ по воде, что вызовет смещение акцентов: от работ по развитию водного хозяйства на программы по защите окружающей среды и рациональному использованию водных ресурсов;
- c) повышенное внимание будет уделяться сохранению воды и ее повторному использованию на всех стадиях развития проекта — в некоторых районах повторно используемая вода стоит теперь меньше, чем свежая;
- d) принятие законодательных актов, направленных на защиту окружающей среды приведет к сдерживанию тех потребителей, кто несет ответственность за загрязнение водных источников;
- e) произойдет переориентация законов в сторону усиления ответственности руководителей водохозяйственных органов и потребителей воды за строгое обоснование своих потребностей, а также на усиление внимания по отношению к приоритетным направлениям водопользования (например в отношении рыбы и диких животных) по сравнению с традиционными направлениями (например сельское хозяйство и промышленность);
- f) при региональном и бассейновом планировании водопользования особое внимание будет уделяться решению пограничных и спорных вопросов.

Эти направления говорят о том, что для управления водным хозяйством в будущем потребуется большая координация усилий по сбору данных. Управление водным хозяйством становится все более комплексным, интегрирующим дисциплины и специальности, и поэтому требуются разнообразные данные о количестве и качестве воды, подземных и поверхностных водах, отдельных бассейнах и регионах. Текущие проблемы, связанные с доступностью, совместимостью и надежностью таких данных, должны быть пересмотрены с учетом вышеуказанных обстоятельств.

Для получения общих данных о климате и речном стоке разных бассейнов необходимо комплексное планирование сетей. В то время как основная масса потребителей будет и в дальнейшем интересоваться информацией, необходимой для целей анализа и проектирования, больше внимания должно быть сосредоточено на необходимости получения всесторонней региональной информации о поверхностных водах для решения различных запросов и проблем, связанных с водой. Имеется в виду обзорная информация, перечень факторов и обобщения, карты осадков и стока, гидрологическая оценка бассейнов и регионов, а также информация об оценке качества воды и проблемах подземных вод. Использование данных о воде в реальном масштабе времени становится все более актуальным.

#### 48.4.2 *Характер и релевантность сети станций*

Примером является Канадская наблюдательная сеть, управление которой основано на договорах между федеральными и провинциальными органами и которая включает 2 700 действующих гидрометрических станций и 200 действующих станций по измерению стока наносов плюс 3 100 и 600 закрытых станций (соответственно). Эта сеть станций и ее данные в значительной степени предназначены для удовлетворения нужд клиентов в решении водоресурсных проблем как с экономической, так и природоохранной точек зрения. В этом смысле сеть поддерживает устойчивое развитие водного хозяйства через широкомасштабное планирование, проектирование и оперативное обслуживание клиентов. Однако ценность базы данных может быть повышена путем более расширенного толкования ее возможностей в отношении состояния водных ресурсов, их характерных особенностей и тенденций.

И все же существующая в Канаде сеть считается недостаточной для того, чтобы удовлетворять многочисленные нужды устойчиво развивающегося водного хозяйства. Недавно проведенные оценки выявили ряд районов, где имеющиеся данные не отвечают требованиям. Например, требуется большее число гидрометрических станций для того, чтобы определить изменчивость гидрологических характеристик применительно к региональной гидрологии. Сегодня имеются только около 500 станций с естественным стоком, достаточно продолжительным периодом наблюдений и качественными данными, пригодными для региональной гидрологии. Эти станции не обеспечивают надлежащего представления о природных условиях ни в масштабе бассейна, ни в масштабе Канады. Большинство из них расположено в южных частях страны, вследствие чего остается мало возможностей для описания и понимания естественных процессов стока в речных бассейнах, расположенных в средней и северной частях страны. Период действия этих станций и их пространственный охват являются основными показателями для решения гидрологических задач.

Растущая урбанизация, согласно отчету МКВРОС, представляет собой серьезную проблему для устойчивого развития водного хозяйства. Однако для изучения

влияния урбанизации на водные ресурсы существующая степень охвата наблюдениями городских бассейнов является недостаточной, и пункты наблюдения распределены неравномерно.

Мониторинг переноса наносов характеризуется такими же возможностями и ограничениями. Хотя большинство пунктов наблюдений в Канаде размещены в соответствии с требованиями проектирования (например для оценки заиления водохранилищ) или с целью сбора долговременной информации в ключевых пунктах наблюдений, их данные могут быть использованы для описания переноса наносов в речных системах. Эта информация требуется при решении многих вопросов, связанных с окружающей средой, например при изучении перемещения загрязнений взвешенными наносами. Однако требуется лучшее изучение вопросов переноса наносов в масштабе всей речной системы, и проведение мониторинга перемещения наносов должно быть скординировано по длине речных систем. Методика отбора проб, период наблюдений, качество записей — должны быть сопоставимы в пределах бассейна.

В заключение необходимо признать, что существующие национальные сети наблюдений, хотя и вносят значительный вклад в устойчивое управление водным хозяйством, нуждаются в серьезном совершенствовании для того, чтобы обеспечивать получение достаточной информации, направленной на решение администрацией водного хозяйства насущных проблем окружающей среды.

#### 48.4.3 *Выбор стратегии создания сети*

Помимо попыток улучшить репрезентативность данных существующих гидрологических сетей, гидрологические службы должны разрабатывать многоцелевые стратегии проведения мониторинга. В выбранных для этой цели бассейнах деятельность по сбору гидрометрической информации должна быть скординирована с программами наблюдений за стоком наносов, качеством воды, метеорологическими характеристиками и условиями обитания живых организмов (раздел 20.1.4). Например, применительно к изучению перемещения загрязнения взвешенными наносами требуются сведения об их источниках, путях движения и происхождении тонкодисперсных частиц. Для этого требуется понимание как процесса стока, так и режима стока наносов. Для интерпретации данных о концентрации загрязняющих веществ или для расчета их содержания такой комплексный мониторинг необходим на всех стадиях от планирования научных исследований до подготовки отчетных материалов.

Для максимальной эффективности всех программ по сбору данных о воде необходимо развивать комплексное планирование соответствующих сетей. В последних исследованиях [3] делается попытка определить требования, предъявляемые к сети различными потребителями, и в конечном итоге скординировать сбор данных на бассейновом уровне с тем, чтобы адекватные данные о воде (т. е. осадки, сток, подземные воды и качество воды) имелись в наличии применительно к будущим потребностям.

Нынешние программы мониторинга могут быть улучшены путем использования дополнительных материалов. Так, например, результаты изучения источников речных наносов и морфологических изменений речных русел [4, 5] дополняют данные стандартных наблюдений по определению режима реки. Эти знания, которые невозможно получить только на основании проведения стандартного мониторинга, используются в рыбном хозяйстве при гидротехнических изысканиях и изучении качества воды.

С другой стороны, при проектировании городских дренажных систем все более необходимо учитывать вопрос качества воды. При составлении соответствующих программ мониторинга должны быть предусмотрены вопросы отбора проб через короткие интервалы времени, комплексный мониторинг осадков и стока и очень быстрая выдача информации применительно к используемым данным. Эти условия резко отличаются от тех, которые обеспечиваются проведением обычного мониторинга.

Использование компьютерных моделей является лишь одним способом улучшения информации, получаемой по данным мониторинга. В определенных случаях проектирование сети мониторинга может быть улучшено по результатам моделирования.

#### 48.5 Заключение

Гидрологические службы располагают многими данными и информацией, необходимой гидрологам. Для того чтобы получить максимальную пользу и выгоду, данные должны быть достаточными, надежными и доступными для потребителя. Главная проблема заключается в том, что часто нет данных по конкретному интересующему бассейну. Метеорологические данные часто оказываются несопоставимыми с данными о речном стоке как в отношении места, так и времени получения. Комплексное планирование сети могло бы создать возможности для координированного проектирования и эксплуатации сети. Таким образом могли бы быть получены согласованные ряды данных, что позволит создавать более эффективные способы эксплуатации сети. Кроме того, лучшие технические возможности для обмена и передачи информации могут быть разработаны и применены для решения гидрологических задач. Несогласованность массивов данных применительно к разным агентствам, регионам, странам не может быть устранена за короткий период. Однако обобщение массивов данных, их сопоставление по наиболее широко применяемым параметрам, таким, как осадки и сток, было бы полезным шагом в плане повышения ценности этой информации для гидрологических целей.

Данная глава выяснила необходимость выработки единых подходов и принципов комплексности при управлении водным хозяйством. Главной проблемой для национальных агентств будет адаптация к этому новому образу мышления, однако это совершенно необходимо для устойчивого развития водного хозяйства.

**Список литературы**

1. Организация Объединенных Наций, 1992: *Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде: Проблемы развития в XXI веке*, 26–31 января 1992 г., Дублин, Ирландия.
2. International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources/United Nations Environment Programme/World Wildlife Fund, 1991: *Caring for the Earth: A Strategy for Sustainable Living*. Gland, Switzerland.
3. Perks, A. R., et al., 1989: *New Brunswick Hydrometric Network Evaluation: Summary Report*. Environment, Canada and New Brunswick Department of Municipal Affairs and Environment, Dartmouth, Nova Scotia.
4. Church, M. A., Kellerhals, R. and Day, T. J., 1989: Regional clastic sediment yield in British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 26, No. 1, pp. 31–45.
5. Carson, M. A., 1987: *An Assessment of Problems Relating to the Source, Transfer and Fate of Sediment Along the Mackenzie River, NWT*. Internal Report, Water Resources Branch, Environment Canada.

## ГЛАВА 49

### КАЧЕСТВО ВОДЫ И ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

#### 49.1       **Общие положения**

Водохозяйственные проекты должны планироваться и осуществляться таким образом, чтобы обеспечивать соблюдение требований стандартов по качеству воды и не допускать ухудшения качества воды на нижележащем участке воды. Хорошо известно, что существует тесная связь между количеством и качеством воды водного объекта. Поскольку в связи с осуществлением водохозяйственных проектов количественные характеристики водных объектов часто меняются, то оценка возможных изменений качества воды становится возможной, если такие связи хорошо изучены и определены. К сожалению, они весьма сложны, а данные, необходимые для их определения, редко имеются в наличии. По этой причине после осуществления такого проекта в основном возможны лишь приблизительные оценки изменения качества воды. Модели качества воды могут быть полезны при решении этой проблемы. Однако правильная калибровка и проверка достоверности таких моделей требуют достаточно длительного периода одновременных наблюдений за количеством и качеством воды так же, как и других сведений о существующих водохозяйственных проектах. Некоторые действия, рекомендуемые в отношении качества воды и соответственно водных экосистем, выработаны *Международной конференцией ООН по водным ресурсам и окружающей среде: Проблемы развития в XXI веке* [1].

#### 49.2       **Связь между количеством и качеством воды**

##### 49.2.1       **Ручьи и реки**

Изменчивость качества речных вод тесно связана с изменчивостью речного стока. Влияние изменений речного стока на содержание в воде различных веществ разносторонне и может проявляться в различных направлениях. Увеличение водности реки обычно ведет к следующим явлениям:

- a) разбавлению загрязняющих веществ, поступающих со сточными водами;
- b) увеличению содержания наносов, поступающих с поверхностным стоком и за счет взмучивания донных отложений;
- c) освобождению элементов, абсорбированных или выпавших в осадок (например: фосфатов, тяжелых металлов);

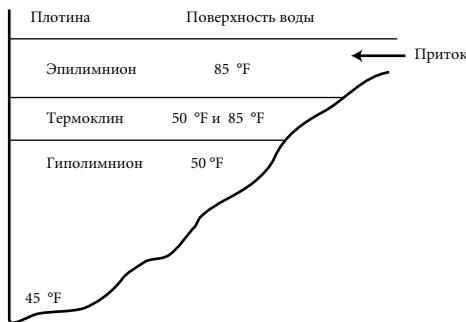
- d) увеличению БПК из-за вымывания раскисляющих веществ из речного русла;
- e) уменьшению доли подземной составляющей речного стока, приводящему обычно к снижению pH;
- f) вымыванию микроорганизмов, бентоса, приводящего к снижению концентрации водных микроорганизмов и уменьшению времени восстановления;
- g) ослаблению воздействия залповых сбросов загрязняющих веществ;
- h) уменьшению поглощения солнечной радиации и, следовательно, ослаблению процесса фотосинтеза;
- i) повышению турбулентности и улучшению аэрации.

Последовательность и время наступления высоких расходов являются определяющими факторами в развитии многих из перечисленных выше явлений. Вторая волна половодья, следующая вскоре после первой, может оказать меньшее влияние, чем первая. Оттепель и осадки после длительного холодного периода могут привести к резкому увеличению притока соленых вод с дорог, покрытых противоналедной смесью и к резкому повышению содержания натрия и хлора, несмотря на увеличение стока. Землепользование, растительный покров и другие характеристики той части бассейна, в которой формируется паводок, являются еще одной группой факторов, оказывающих значительное влияние на степень изменения качества воды, вызванного паводком.

Если повышение водности реки приводит к значительному затоплению поймы, то появляются дополнительные факторы, оказывающие влияние на качество воды. Наиболее существенные из них — следующие:

- a) ослабление самого паводка из-за аккумуляции воды на пойме и в берегах, приводящее к общему уменьшению влияния на качество воды;
- b) увеличение соотношения водная поверхность—объем, что создает благоприятные условия для поглощения солнечной радиации и хода фотосинтеза;
- c) снижение скорости течения на пойме, приводящее к уменьшению реаэрации и отложению взвешенных наносов за пределами главного русла;
- d) усиление контакта с ранее осажденными наносами, различными типами почвенных структур, отвалами и т. д., что ведет к загрязнению реки.

В периоды низкого стока обычно наблюдаются противоположные явления. Кроме того, меженные периоды часто сопровождаются относительно высокой суточной изменчивостью характеристик качества воды, например: содержания растворенного кислорода,  $\text{CO}_2$ , pH и температуры воды. В условиях аридного климата значительное влияние на концентрацию различных веществ в воде оказывает испарение. В условиях холодного климата, в периоды низкого стока, может отмечаться дефицит кислорода всякий раз, когда ледовый покров препятствует процессу реаэрации.



Характерный профиль, показывающий летнюю температурную стратификацию воды в крупном водохранилище с высокой плотиной

#### 49.2.2 *Большие озера и водохранилища*

Температурная стратификация водоема является результатом природных воздействий. Однако тепловое «загрязнение» может быть и привнесенным элементом (раздел 49.5.4). На рисунке, приведенном выше, показан типичный профиль температурной стратификации в летний период для крупного водохранилища. Температурная стратификация, особенно в богатых биогенными элементами озерах, соответствует распределению растворенного кислорода, а частично, и других растворенных веществ.

Эпилимнион, т. е. верхний слой воды, который летом теплее других слоев, обычно отличается лучшим качеством воды. В нем обычно можно ожидать пониженное содержание силикатов, способствующих росту диатомовых водорослей и более низкие значения жесткости воды за счет выпадения осадков.

Гиполимнион, т. е. нижний слой воды, который летом холоднее других слоев, отличается пониженным содержанием растворенного кислорода. Различные вещества часто аккумулируются в этом слое за счет осаждения на дно, адсорбции на поверхности наносов, а также поглощения живыми организмами. В этом слое может иметь место анаэробное разложение водорослей и других организмов. Наблюдаются тренды увеличения концентрации аммония и сульфида водорода, уменьшения концентрации нитратов и сульфатов. В период погружения поверхностного слоя воды, вызванного сезонным охлаждением, имеет место конвективная циркуляция, которая приводит к перемешиванию и выравниванию температур воды по глубине.

Кроме перечисленных выше последствий, могут иметь место следующие:

- a) в больших озерах и водохранилищах органические вещества разлагаются в большей степени из-за длительного времени пребывания в этих водных объектах;
- b) различия в качестве воды по этой причине незначительны;
- c) наличие водорослей ускоряет процесс образования кишневидных организмов и галокарбонатов.

**49.3 Влияние водохозяйственных проектов на качество воды**

**ручьев и рек**

**49.3.1 Плотины и запруды**

Поднимая уровень воды в верхнем бьефе, дамба и в меньшей степени запруда обычно оказывают следующие воздействия на качество воды на вышерасположенном участке реки:

- a) ускоряют процессы самоочищения из-за увеличения времени пребывания воды на рассматриваемом участке и повышенного отложения взвешенных наносов, что приводит к увеличению поглощения солнечной радиации и к изменениям характеристик наносов в речном русле;
- b) повышают продукцию фитопланктона, увеличивают потребление кислорода и усиливают суточные колебания содержания кислорода, pH и CO<sub>2</sub>.

Миграция рыб может быть нарушена как вследствие возникновения физического барьера, так и из-за изменений качества воды. Изменения прибрежной растительности, которые происходят под влиянием рельефа, климата и колебаний уровня воды, могут также влиять на качество воды. В условиях холодного климата плотины и запруды создают благоприятные условия для удлинения периода ледостава на участках верхнего течения реки. Это приводит к уменьшению реаэрации, а в случае большого запаса воды в водоеме, может вызывать изменения в термической стратификации водной массы. Повышенные нагрузки загрязняющих веществ на верхних участках могут приводить к эвтрофикации водоема или к возникновению анаэробных условий (раздел 49.5.1).

Влияние дамбы или запруды на качество воды на нижерасположенных участках зависит от объема воды в верхнем бьефе, конструкции дамбы, условий ее эксплуатации и других факторов. Наиболее важными последствиями являются:

- a) уменьшение количества взвешенных частиц, загрязняющих веществ и мутности;
- b) изменения химических характеристик воды (часто более низкая концентрация растворенного кислорода и нитратов и повышенное содержание фосфатов, углекислого газа и метана; особенно, если в верхнем бьефе преобладают анаэробные условия);

- c) снижение температуры воды летом и повышение ее зимой;
- d) уменьшение внутрисуточной амплитуды колебаний температуры воды, к которой приспособлены речная флора и фауна.

#### 49.3.2 *Работы по регулированию речных русел*

Работы по регулированию речных русел обычно включают углубление и спрямление русел для различных целей (судоходство, регулирование паводков, защита от эрозии) и таким образом приводят к изменениям геометрических и гидравлических характеристик речного русла, а в некоторых случаях также и поймы.

В случае, когда регулирование речного русла осуществляется в целях судоходства, эти работы обычно включают возведение навигационных плотин и шлюзов. Кроме того влияния на качество воды, которое оказывают плотины (раздел 49.3.1), работы по регулированию русел и эксплуатация навигационных каналов увеличивают мутность и перемешивание воды, а также ее аэрацию за счет механического воздействия движущихся судов. С другой стороны, суда являются источником как постоянных, так и случайных загрязнений.

В других случаях работы по регулированию речных русел приводят к уменьшению процессов самоочищения, т. к. спрямление берегов уменьшает застойные зоны, в которых происходит самоочищение воды и создаются благоприятные условия для развития животного и растительного мира. Сокращение площади водной поверхности относительно объема воды приводит к уменьшению поглощения солнечной радиации и реаэрации. Уменьшение реаэрации может быть частично компенсировано в том случае, когда регулирование русла приводит к более высоким скоростям течения воды.

#### 49.3.3 *Изъятия стока и переброски*

Помимо эффекта регулирования стока при сооружении плотин многие водохозяйственные проекты связаны с изъятием стока ниже по течению посредством устройства водозаборов в целях водоснабжения или с переброской воды из соседних речных бассейнов.

Если забираемая вода используется, а затем загрязненные остатки ее возвращаются в реку-донор, или когда вода изымается с менее загрязненных участков поперечного сечения реки, то влияние водозаборов на качество воды аналогично уменьшению стока речных вод или увеличению сброса загрязняющих веществ (раздел 49.5). Сброс загрязняющих остатков является предметом контроля с учетом установленных требований по качеству воды водотоков.

Влияние перебросок стока на качество воды зависит, главным образом, от качества перебрасываемых в реку вод. Добавление воды худшего качества равносильно сбросу загрязняющих веществ.

#### 49.4      **Влияние водохозяйственных проектов на качество вод крупных озер и водохранилищ**

Качество воды в больших озерах и водохранилищах может быть либо улучшено, либо ухудшено под влиянием водохозяйственных мероприятий. Изъятия воды лучшего качества (например из эпилимниона) будут обычно ухудшать качество воды в озере. То же самое происходит при сбросах воды низкого качества.

Качество воды в больших водохранилищах зависит в значительной степени от характеристик подстилающей поверхности до затопления и способов обработки земли, которым она подвергалась. Если дно будущего водохранилища покрыто почвами с богатым содержанием органики (гумуса), то после заполнения водохранилища они выщелачиваются и ускоряют процесс эвтрофикации (раздел 49.5.1). Этого можно избежать, удалив растительность и почвенный покров до наполнения водохранилища, что является достаточно дорогостоящим мероприятием.

#### 49.5      **Изменение качества воды под влиянием сброса загрязняющих веществ**

##### 49.5.1      **Эвтрофикация**

Одной из наиболее распространенных форм загрязнения является чрезмерная концентрация биогенных веществ, источником которых служат коммунальные или промышленные сточные воды. Это обычно приводит к повсеместному развитию различных водорослей, особенно на участках с низкими скоростями течения, а также к значительному сокращению или даже исчезновению разновидностей растительного и животного мира. Этот процесс известен как эвтрофикация. Эвтрофикация является естественным природным процессом, который присущ озерам на стадии их «зрелости» и «старости». Однако в естественных условиях этот процесс может затягиваться на сотни и тысячи лет в зависимости от размера озера, гидрологических условий, а также почвенного покрова бассейна. Человечество несет ответственность за ускоренную эвтрофикацию большого числа озер во всем мире.

Проблема эвтрофикации и обуславливающих ее факторов является главной проблемой качества воды. Хотя этому вопросу посвящены значительные исследования, пока невозможно количественно описать процесс обогащения вод биогенными веществами и рост водорослей, а также другие проявления эвтрофикации. Как уже отмечалось, следующие элементы имеют особое значение для роста водорослей: B, C, Ca, Cl, Co, Cu, Fe, H, K, Mg, Mn, Mo, N, Na, P, S, V и Zn. Хотя отсутствие любого из этих элементов может ограничивать рост водорослей, однако азот и фосфор являются, вероятно, самыми главными элементами, лимитирующими рост водорослей в природных водах.

В некоторых странах делались попытки остановить эвтрофирование путем запрещения использования фосфорных соединений в моющих средствах и внедрения таких технологий очистки воды, которые позволяли бы извлекать фосфор и азот.

Влияние эвтрофикации отражается в удивительных изменениях соответствующих водных экосистем. Экстремально загрязненная окружающая среда имеет несколько разновидностей. Когда загрязнение вызвано токсичными веществами, число выживших организмов каждого вида — низкое, а когда оно обусловлено, главным образом, биогенными веществами, то, несмотря на то что количество видов — небольшое, число организмов каждого вида — очень велико.

#### 49.5.2 *Органические вещества и самоочищение*

Большое количество загрязнений коммунального, промышленного и особенно сельскохозяйственного происхождения содержат органические вещества. Ряд процессов, происходящих в природных водах, направлен на трансформацию этих органических веществ в более или менее безвредные минеральные вещества. Это явление известно как процесс самоочищения. Некоторые из этих веществ перерабатываются микроорганизмами и становятся вторичными органическими загрязнителями. До биологического разложения, ведущего к самоочищению, может иметь место процесс, когда растворенные в воде органические вещества должны быть адсорбированы и задержаны на поверхности твердых частиц. Адсорбция может иметь место на поверхности твердых частиц дна, берегов, растений, а также взвешенных частиц.

Большая часть процессов биологического разложения сопровождается потреблением кислорода, который является ключевым фактором в процессе самоочищения. Когда потребление кислорода в воде происходит настолько быстро, что превышает скорость его поступления из атмосферы или за счет биологических процессов производства кислорода, способность аэробного самоочищения водной массы ограничивается. Это происходит в том случае, когда появляются следующие условия (одно или несколько):

- а) слишком большое содержание органических веществ;
- б) процессы биологической деструкции ускоряются каким-либо фактором, например повышением температуры;
- с) пополнение кислорода ослабляется температурной стратификацией, ледовым покровом или другими причинами.

Когда самоочищающая способность превышается, разложение органического вещества продолжается в анаэробных условиях, что во многих случаях служит препятствием для использования воды. Так, использовать воду в таких условиях с целью рекреации и рыболовства становится невозможным, значительно затрудняется ее использование, например для водоснабжения и некоторых других целей.

#### 49.5.3      *Адсорбция и аккумуляция загрязняющих веществ*

Некоторые вредные вещества, адсорбированные на органических и минеральных взвешенных частицах, позже осевшие на дно, временно выводятся из воды. Микроорганизмы также способны собирать и удерживать возле себя при биохимических процессах некоторые органические и минеральные загрязняющие вещества. К примеру, концентрация некоторых пестицидов в микроорганизмах может быть до 300 000 раз выше того уровня, который отмечается в окружающей водной среде. Однако под воздействием физических и биологических процессов абсорбированные вещества и вещества, аккумулированные микроорганизмами, могут впоследствии возвращаться в водную массу в растворенном виде или в форме частиц.

Накопление загрязняющих веществ микроорганизмами имеет особое значение, так как микроорганизмы являются отправной точкой пищевой цепи, передающей загрязняющие вещества от одного уровня организмов к другому со все более высокими концентрациями. Этот процесс вызывает, например, ртутное отравление, приводящее к известному заболеванию минемате.

#### 49.5.4      *Тепловое загрязнение*

Тепловое загрязнение определяется как увеличение температуры водного объекта по сравнению с нормальным температурным уровнем, вызванное сбросом промышленных или коммунально-бытовых сточных вод, в частности вод с градирен.

Влияние теплового загрязнения на качество воды достаточно сложно и связано с воздействием повышенной температуры на вязкость воды, снижение ее способности растворять кислород и на возрастание химической и биологической активности. Термическое загрязнение также может быть фактором, влияющим на температурную стратификацию. При термическом загрязнении удлиняется период биологической продуктивности, что приводит к увеличению нагрузки органическими загрязнениями. Кроме того, происходит замена зеленых водорослей на сине-зеленые водоросли, которые передают воде нежелательные характеристики запаха, вкуса и токсичности.

Как уже отмечалось, процессы самоочищения ускоряются при более высоких температурах и, следовательно, под влиянием теплового загрязнения, причем иногда до такой степени, что может возникать внезапный дефицит кислорода. В зимний период вследствие теплового загрязнения задерживается формирование льда, продлевая период реаэрации.

#### 49.6            *Меры по снижению влияния загрязняющих веществ на качество воды*

Эти меры могут быть подразделены на две большие группы: предупредительные и нейтрализующие. Везде, где только возможно, необходимо принимать предупредительные меры.

#### 49.6.1 *Предупредительные меры*

Предупредительные меры заключаются в удалении загрязняющих веществ из сточных вод, изменении промышленной технологии для уменьшения загрязнения сточных вод, в изменении химического состава некоторых видов промышленной продукции (например исключение фосфорных компонентов из моющих средств), в искусственном охлаждении промышленных сточных вод и т. д. Если загрязняющие вещества образуются в результате смыва с поверхности речного бассейна (например: пестициды, гербициды, удобрения, неконтролируемые городские стоки), то снижение загрязнения может быть достигнуто только путем прекращения неконтролируемого поступления загрязняющих веществ на водосбор и применения мер по уменьшению поверхностного стока и эрозии почв.

Значительная доля загрязняющих веществ образуется в результате эрозии почв. Предупредительные меры в этом случае могут заключаться в проведении лесонасаждений или выделении подходящих участков под пастбища, а также в строительстве соответствующих сооружений. И наконец загрязнения, которые дают мусорные свалки, могут достигать в локальном масштабе больших размеров. Этого можно избежать, соответствующим образом располагая и проектируя такие свалки.

#### 49.6.2 *Нейтрализующие меры*

Уменьшить загрязнение водного объекта после поступления в него загрязняющих веществ, как правило, трудно и дорого. В большинстве случаев это можно сделать только применительно к тому объему воды, который забирается из водоема для различных целей (например хозяйственно-бытового или промышленного водоснабжения). Однако в особых случаях могут предприниматься некоторые нейтрализующие меры для водного объекта в целом. Для рек такие меры заключаются, главным образом, в проведении искусственной реаэрации (насыщение кислородом) или перемешивания, а также в осуществлении дноочерпательных работ по извлечению осевших загрязняющих веществ. Применительно к озерам и водохранилищам могут осуществляться следующие меры:

- a) регулярное опорожнение водоема в период от падения уровня до весеннего наполнения для взаимодействия органических веществ с воздухом в целях их аэробного разложения;
- b) дноочерпательные работы на участках озера с наибольшим содержанием органических и загрязняющих веществ;
- c) принудительная реаэрация нагнетанием воздуха в слои с низким содержанием кислорода;
- d) сбор и истребление органических веществ, представленных в виде цветущих водорослей, нежелательных видов рыб и т. д.

**Список литературы**

1. Организация Объединенных Наций, 1992: *Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде: Проблемы развития в XXI веке*, 26–31 января 1992 г., Дублин, Ирландия.

## ГЛАВА 50

### ОЦЕНКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

#### 50.1       **Общие положения**

Вода, подобно воздуху, которым мы дышим, является основой всей жизни на Земле. Она жизненно необходима при реализации многих аспектов экономического и социального развития, например: для производства энергии, ведения сельского хозяйства, бытового и промышленного водоснабжения. Вода является основным компонентом окружающей среды в целом. Ныне углубляется осознание того, что развитие всего общества так же, как и развитие системы водных ресурсов, должно быть устойчивым, что природные ресурсы мира должны разумно использоваться и охраняться в целях удовлетворения потребностей настоящего и будущего поколений (глава 48).

#### 50.2       **Необходимость оценки водных ресурсов**

Под оценкой водных ресурсов (ОВР) понимается установление их источников, объема пространственно-временного распределения, а также качества водных ресурсов, что является основой при определении возможностей их использования и охраны [4]. Оценка водных ресурсов крайне важна для разумного и устойчивого использования мировых водных запасов. Некоторые причины, подтверждающие вышеизложенное, перечислены ниже [2]:

- a) с ростом народонаселения увеличиваются потребности в воде для питьевых целей, производства продовольствия, гигиены и других основных социальных и экономических нужд. Однако мировые водные ресурсы ограничены. Рост потребностей в водных ресурсах уже привел к их дефициту во многих районах мира. Дальнейшее развитие этой тенденции применительно ко многим другим регионам в течение последующих двух десятилетий приведет к тому, что к началу следующего века мировые водные ресурсы будут полностью использованы;
- a) антропогенная деятельность становится все более интенсивной и разнообразной и оказывает всевозрастающее и непосредственное влияние на природные ресурсы, истощая и загрязняя их. Это особенно относится к водным объектам многоцелевого назначения, качество воды которых может быть многократно ухудшено за счет сброса в них широкого спектра загрязняющих веществ — химических, радиоактивных, микроорганизмов, наносов, — а также за счет физических воздействий;

- c) природные явления, связанные с водной стихией, такие, как наводнения, засухи и тропические циклоны, являются одними из наиболее разрушительных, в которых погибли и которые принесли страдания многим миллионам людей на протяжении всего хода истории. Вырубка леса и урбанизация особенно увеличивают опасность катастрофических наводнений, их масштабы и частоту проявления;
- d) растет понимание того, что климат на планете не является постоянным и в действительности может изменяться под влиянием антропогенной деятельности. Несмотря на то что существует широкоизвестное представление о том, что рост глобальной температуры из-за газов, вызывающих парниковый эффект, вызовет потепление, более важные последствия, вероятно, произойдут в отношении распределения осадков, стока и подземных вод. Нет оснований полагать, что будущие проявления этих гидрологических явлений будут такими же, как в прошлом.

Только имея надежные данные наблюдений и информацию о состоянии и динамике водных ресурсов, включая количественные, качественные показатели и статистические данные о таких явлениях, как наводнения, а также данные об использовании воды для различных хозяйственных целей, можно принять обоснованное решение в отношении оптимального использования водных ресурсов.

Оценка водных ресурсов в значительной степени является предпосылкой для всех дальнейших аспектов освоения и эксплуатации водных ресурсов. Этот факт был признан Конференцией ООН по водным ресурсам, состоявшейся в Мар-дель-Плате в 1977 году, посредством принятия Резолюции 1 и Рекомендации А Плана действий, принятого в Мар-дель-Плате [3], которые подчеркнули необходимость более глубокого изучения количественных и качественных характеристик поверхностных и подземных водных ресурсов, а также всестороннего их мониторинга в целях управления ими. Последующая Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде, состоявшаяся в Дублине 26–31 января 1992 г., приняла ряд рекомендаций, направленных на поддержку национальных усилий по оценке водных ресурсов [1].

### 50.3 Использование информации о водных ресурсах

Гидрологические и гидрометеорологические службы или соответствующие агентства были организованы в различных странах для систематического сбора, хранения и распространения данных о водных ресурсах (главы 21–25). Первостепенной их задачей является обеспечение информацией о состоянии и изменениях водных ресурсов ответственных лиц, принимающих решения. Такая информация может быть затребована для следующих целей [2]:

- a) оценки водных ресурсов страны (количественные и качественные показатели, распределение во времени и пространстве), возможностей удовлетворения водой потребителей и создания запасов воды с целью удовлетворения текущих и будущих потребностей;

- b) планирования, проектирования и эксплуатации водохозяйственных объектов;
- c) оценка природных, экономических и социальных последствий осуществления водохозяйственных мероприятий в настоящем и будущем, а также планирование рациональной стратегии управления водными ресурсами;
- d) обеспечение безопасности людей и их имущества при стихийных бедствиях, связанных с водой, особенно при наводнениях и засухах.

Чаще всего информация о водных ресурсах собирается для какой-либо специальной цели, например применительно к проектированию гидроэнергетических систем. Однако усиление конкуренции среди водопользователей при недостатке водных ресурсов требует того, чтобы водные ресурсы были управляемы в целом, так, чтобы взаимные требования различных проектов и водопользователей могли быть разрешимы. В этом случае требуются значительно большие бюджетные средства для держателей информации о водных ресурсах, поскольку необходимо представлять множество различных видов информации одновременно, и для различных пользователей она должна быть подготовлена в определенных формах. Необходимо поэтому, чтобы агентства, выполняющие оценки водных ресурсов, понимали потребности всех водопользователей, а не только тех, с которыми они традиционно имеют дело. Еще более важным требованием является необходимость смотреть вперед, предвидя возможные потребности будущих пользователей таких данных до того, как эти потребности станут вполне определенными. Следовательно необходимо, чтобы проектирование и совершенствование сетей по сбору соответствующих данных, особенно в отношении базовых станций, осуществлялось скоординированно, чтобы станции мониторинга различных элементов гидрологического цикла были надлежащим образом взаимосогласованы как по количеству, так и по расположению в целях создания интегрированной сети (главы 20.1.4 и 48.4). Такой подход должен повысить информационные возможности баз данных как в отношении текущих, так и в отношении будущих потребностей.

С ростом наших не очень определенных знаний о таких воздействиях, как возможное глобальное изменение климата и антропогенное влияние на окружающую среду (например урбанизации), все большее значение будет придаваться информации, являющейся основой для устойчивого развития и освоения водных ресурсов.

#### 50.4 Виды информации о водных ресурсах

Разнообразие возможных потребностей в отношении информации о водных ресурсах определяет широкий диапазон видов данных. Общепринятый блок информации о водных ресурсах содержит статистику разнообразных метеорологических и гидрологических элементов. В состав этих элементов входят следующие [2]:

- a) осадки, т. е.: дождь, снег, водный конденсат из тумана;

- b) уровни и сток реки, уровни озера и водохранилища;
- c) уровень подземных вод;
- d) суммарное испарение;
- e) концентрация наносов и твердых частиц в реках;
- f) качество воды (бактериологическое, химическое и физическое) поверхностных и подземных источников.

В статистические данные включаются:

- a) среднегодовые, месячные или сезонные значения;
- b) максимумы, минимумы и выборочные распределения;
- c) характеристики изменчивости, например стандартное отклонение;
- d) непрерывные графические изображения в виде, например гидрографа речного стока.

Необходимым требованием в отношении как исторических, так и текущих данных является обеспечение всего диапазона запросов, начиная со стадии планирования водохозяйственных мероприятий до реализации водохозяйственных проектов и систем противопаводковой защиты. При прогнозировании паводков или низкого стока (глава 44) могут потребоваться данные, рассчитанные на будущее с использованием численных моделей трансформации стока (глава 34).

В работе ЮНЕСКО/ВМО *Water-resource Assessment Activities: Handbook for National Evaluation* [4] (Оценка водных ресурсов: справочник по рассмотрению национальных возможностей) представлен перечень типов водохозяйственных проектов, для которых требуется гидрологическая информация. Этот перечень приведен в таблице ниже. Помимо необходимости выполнения общепринятых измерений, все более возрастают потребности в измерении дополнительных характеристик пресноводных систем и более крупных экологических структур, в которых пресная вода является только одним из компонентов. Дополнительные характеристики — следующие:

- a) объемы воды, необходимые для промышленного, бытового и сельскохозяйственного использования, а также для судоходства. Эти виды антропогенной деятельности в настоящее время значительно видоизменяют гидрологический цикл во многих бассейнах;
- b) особые характеристики рек, применительно к конкретному виду водопользования, например рыболовству или рекреации;
- c) характеристики водосбора, которые могут иметь отношение к гидрологическому режиму водных объектов, например: виды растительности, влажность почвы, топография, а также характеристики водоносных горизонтов;
- d) показатели экологического состояния, например эвтрофикация озер и данные об ухудшении пресноводных и эстuarных экосистем.

Весь набор данных, имеющих отношение к оценкам водных ресурсов, представляет собой огромный информационный массив, который может требоваться

## Гидрологическая информация, необходимая для водохозяйственных проектов

Тип водохозяйственной деятельности	Уровень воды			Сток воды			Наносы			Качество воды*		
	врем. ряд	макс.	мин.	врем. ряд	макс.	мин.	врем. ряд	макс.	мин.	врем. ряд	макс.	мин.
Перераспределение воды по территории (сбросы, изъятия, каналы)	M	M	M	H	H	H	H	M	M	H	M	M
Перераспределение воды во времени (водохранилища)	M	M	M	H	H	H	H	M	M	H	M	M
Производство энергии (гидроэнергетика, сброс подогретых вод)	H	M	M	H	M	H	H	M	M	M	M	M
Водоудерживающие сооружения (дамбы, дамбы обвалования)	H	H	M	M	H	M	M	M	M	M	M	M
Водосборные устройства (водосливы)	M	H	M	H	H		M	M	M	M	H	H
Улучшение качества воды (очистка природных и сточных вод)				H	M	H	M	M	M	H	H	H
Зонирование (поймы, живописные реки)	H	H	M	M	H	M	M					
Страхование (ущерб от наводнений, ущерб от загрязнения)	H	H		H	H					H	H	
Прогнозы стока и уровня (контроль за паводками, эксплуатация водохранилищ)	H	H	H	H	H	H						
Стандарты и законодательство (качество воды)	M	H	H	M	H	H				H	H	H

H = высокий уровень приоритета; M = средний уровень приоритета.

\* Параметры качества различаются в зависимости от типа проекта.

гидрологическим службам и другим подобным организациям для сбора и архивации этой информации. Различные страны имеют разные приоритеты в отношении такой информации, которая зависит от уровня их экономического и социального развития, чувствительности природной среды к вмешательству человеческой деятельности, а также характера самой окружающей среды, т. е.: климата, рельефа, обилия или, наоборот, дефицита воды.

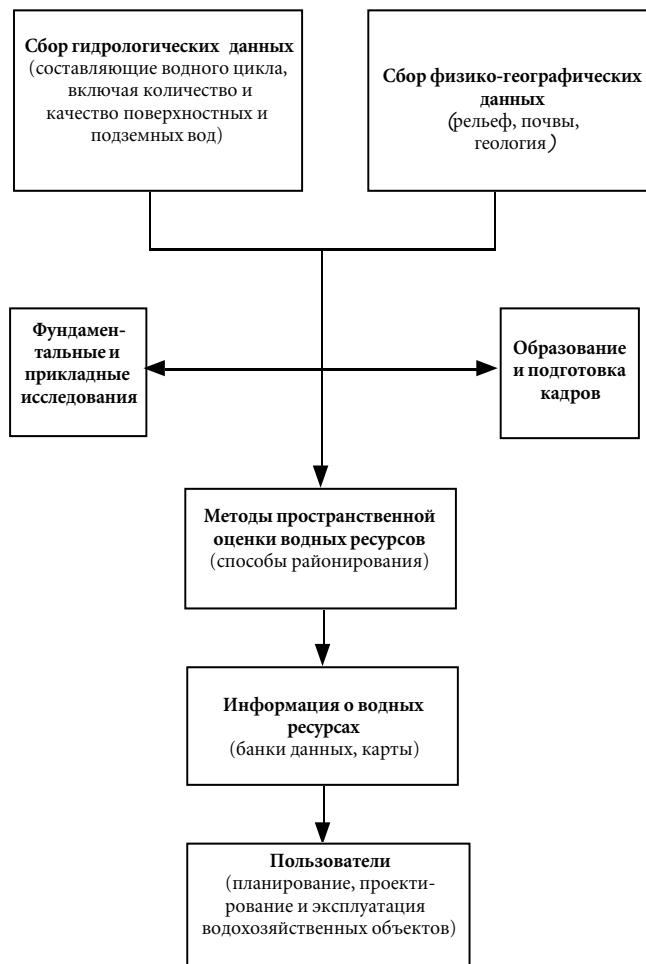
Ниже представлены основополагающие требования для эффективного выполнения программы по оценке водных ресурсов:

- a) используемые данные должны быть высокого качества для обеспечения надежного статистического анализа;
- b) данные и информация, полученная с их помощью, должны точно соответствовать требованиям пользователей;
- c) необходимы комплексные программы наблюдений, предусматривающие одновременные измерения нескольких переменных, чтобы было обеспечено получение экстремальных значений;
- d) должны использоваться и другие виды информации, которые имеют отношение к оценке водных ресурсов и могут быть включены в анализ;
- e) должна применяться эффективная система хранения и распространения данных, чтобы обеспечить их сохранность и целостность, а также возможность их использования в той форме, которая требуется для выполнения анализа (главы 24 и 25).

Вышеперечисленные требования могут быть выполнены с помощью применения новых технологий, например телеметрии, которые позволяют получать данные в реальном масштабе времени посредством использования персональных компьютеров для хранения и обработки данных, применения дистанционного зондирования для более эффективного сбора пространственной информации, а также использования географических информационных систем (раздел 40.7) для анализа пространственного распределения данных. В то же время новые микроКомпьютеры имеют устройства (например оптические диски), позволяющие более быстро считывать данные. Тем не менее, применение новых технологий — не единственное требование. Хорошо обученный и управляемый коллектив является еще более важным требованием. Так как финансовые ресурсы во многих странах продолжают сокращаться, то наличие эффективных организационных структур, позволяющих использовать эти ресурсы более разумно, становится все более важным требованием.

## 50.5        **Компоненты Программы по оценке водных ресурсов**

Для того чтобы обеспечить предварительную оценку имеющихся водных ресурсов, в соответствии с которой разрабатываются национальные или региональные долгосрочные планы управления ими, основополагающая Программа по оценке



Компоненты базовой Программы по оценке водных ресурсов

водных ресурсов предусматривает сбор и обработку существующих гидрологических и гидрогеологических данных, а также дополнительных данных, необходимых для пространственной интерполяции. Такие долгосрочные планы должны базироваться на учете ключевых современных и будущих потребностей в водных ресурсах.

Компоненты Программы по оценке водных ресурсов показаны на выше-приведенном рисунке и включают, главным образом, следующие позиции [4]:

- a) сбор гидрологических данных: сбор исторических данных о компонентах водного цикла в пунктах, распределенных по территории, для которой выполняется оценка водных ресурсов;
- b) сбор физико-географических данных: получение данных о естественных характеристиках подстилающей поверхности, которые определяют пространственные и временные изменения компонентов водного цикла, таких, как рельеф, почвы, геологическое строение, землепользование и растительный покров;
- c) методы, используемые для пространственной оценки водных ресурсов: методы преобразования исходных данных в обобщенную информацию и увязка гидрологических данных с физико-географическими с целью получения информации о характеристиках водных ресурсов в любой точке территории, для которой проводится оценка.

Базовая Программа по оценке водных ресурсов отвечает своей задаче, если вышеуказанные три компонента программы имеются в наличии и если, увязанные между собой, они достаточно надежны для того, чтобы обеспечить информацией по водным ресурсам, необходимой для целей планирования в любой точке территории, для которой выполняется оценка. Нужна определенность в отношении требований каждой отдельной страны к типу информации, требуемой для планирования, способа, которым эта информация получена и передана пользователям, а также последствий, которые возникнут в случае отсутствия такой информации или ее низкой точности при принятии решений на стадии планирования.

Все работы, связанные с составлением Программы по оценке водных ресурсов, требуют наличия квалифицированного персонала, применения эффективного оборудования и методов для полевых изысканий, проектирования и эксплуатации сети, а также надежных методов пространственной интерполяции. Для этих целей может потребоваться обучение соответствующего персонала, а также применение фундаментальных и прикладных исследований для разработки необходимых методических подходов. Анализ этих видов деятельности может дать представление об их соответствии целям базовой Программы по оценке водных ресурсов или, в случае их несоответствия, указать на дополнительные меры, которые должны быть предприняты для обеспечения необходимой базы для дальнейшей разработки соответствующей Программы по оценке водных ресурсов.

## 50.6       **Оценка деятельности в рамках Программы по оценке водных ресурсов**

За оценку водных ресурсов отвечает каждая отдельная страна и любое определение состояния осуществления такой оценки в соответствующей стране является также ответственностью данной страны. Работа [4] была подготовлена с целью повышения возможностей стран оценивать свои достижения в области реализации Программы по оценке водных ресурсов и обеспечивать основу для

определения своих потребностей и действий, неоходимых для удовлетворения минимальных требований. Методология, предлагаемая в *Справочнике*, охватывает весь спектр водных ресурсов. Обычное содержание базовой Программы по оценке водных ресурсов соответствует минимальным принятым требованиям в отношении оборудования, квалификации персонала, уровня обучения и состава научных исследований. Оно включает детальный обязательный набор сведений по каждому компоненту (см. рисунок выше) и предложения по оценке каждого вида деятельности, в большинстве случаев, в количественных показателях.

Результаты такой оценки будут различны для каждой страны в зависимости от показателей соответствующей базовой Программы по оценке водных ресурсов и особенностей страны и ее потребностей. Тем не менее, всегда будет иметь место минимальный набор сведений, которые встречаются практически в каждом случае. Этот набор включает:

- a) анализ наличия основополагающих условий для выполнения базовой Программы по оценке водных ресурсов, их преимуществ и недостатков;
- b) сравнительная оценка наблюдательных сетей и определение тех элементов сети, которые требуют улучшения в отношении плотности станций, оборудования, наблюдателей и руководящего персонала, а также других факторов;
- c) обзор имеющихся обобщений и программ по сбору и обработке физико-географических данных для базовой Программы по оценке водных ресурсов;
- d) оценка применимости различных методов для расширения зоны действия базовой Программы по оценке водных ресурсов, соответствующих данных, а также способов передачи информации;
- e) анализ потребностей в гидрологической информации для долгосрочного планирования, получения и передачи этой информации пользователям, а также результатов использования этой информации в процессе планирования, который определяет соответствие и несоответствие предъявляемым требованиям базовой Программы по оценке водных ресурсов;
- f) оценка состава персонала и квалификационных показателей, требующихся для составлений базовой Программы по оценке водных ресурсов, и оценка существующих программ обучения и подготовки кадров относительно текущих и предстоящих требований;
- g) обзор фундаментальных и прикладных научных исследований в стране (и регионе), их соответствие (или несоответствие) задачам оценки водных ресурсов применительно к текущим и будущим требованиям, включая требования региональной и международной научной и технологической кооперации;
- h) выявление основных причин неувязок в программе в отношении ее структуры, финансовых ресурсов, оборудования, методов и т. д.;
- i) рекомендации по устранению любых недостатков базовой Программы по водным ресурсам путем национального или регионального сотрудничества и/или использования международной помощи.

**Список литературы**

1. Организация Объединенных Наций, 1992: *Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде: Проблемы развития в XXI веке*, 26–31 января 1992 г., Дублин, Ирландия.
2. World Meteorological Organization/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1991: Progress in the implementation of the Mar del Plata Action Plan and a strategy for the 1990s. *Report on Water Resources Assessment*.
3. United Nations, 1977: *Mar del Plata Action Plan*. United Nations Water Conference, Argentina.
4. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1988: *Water-resource Assessment Activities — Handbook for National Evaluation*.

## ГЛАВА 51

### ОЦЕНКА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

#### 51.1       **Общие положения**

Водохозяйственные структуры лишь недавно стали признавать тот факт, что водопользование является реальным запросом, которым можно управлять посредством ценовой политики. Это признание пришло от сознания того, что водные ресурсы, даже в так называемых водообеспеченных странах, стали все больше и больше сокращаться. Более строгие ограничения в отношении коммунального водопотребления, насколько это возможно пробуждение интереса к сохранению и улучшению качества окружающей среды — лишь некоторые проявления этого сознания. Подход «спрос—управление» отличается от традиционных подходов, ориентированных только на имеющийся запас воды в том, что при таком подходе подчеркиваются социальные и экономические аспекты использования той воды, которая имеется в наличии.

Понятие «управление водопотреблением» охватывает широкий круг средств и методов и может отражать три аспекта — экономический, структурный и эксплуатационный и социально-политический [5]. Реалистическое оценивание водных ресурсов — один из фундаментальных подходов к управлению водопотреблением и центральный аргумент при принятии различных решений, связанных с использованием воды. Структурный аспект предполагает видоизменение существующих технологий с целью достижения лучшего управления водопользованием. Примерами структурных мер являются: установка водометров, повторная очистка, установка контрольных русел, оборотная система очистки. Социально-политический аспект управления водопотреблением заключается в проведении общественными организациями политики и соответствующих мероприятий по сохранению водных ресурсов. Он включает подготовку общественных программ, законов, позволяющих разрабатывать кодексы и применять стандарты в отношении водопользования, а также проводить правительенную экономическую политику в отношении водопотребления.

Существующее водопотребление, являющееся основой при разработке водохозяйственного проекта, должно быть рассмотрено в его гидрологической части. Неучет этих требований может привести к экономическим потерям так же, как к возникновению социальных и правовых проблем при эксплуатации водохозяйственного объекта.

## 51.2 Водопользование

Данные о водопользовании необходимы для оценки воздействия антропогенной деятельности на естественный гидрологический цикл. Надлежащая информация об использовании воды может помочь при планировании проектов по водоснабжению, а также при решении таких проблем, как конкурентное использование воды, пополнение запасов воды при их чрезмерном изъятии, а также в периоды засух.

В Соединенных Штатах Америки Конгресс признал необходимым наличие унифицированной, постоянно пополняемой и доступной информации о использовании вод и поручил Геологической службе США учредить национальную программу получения такой информации. Геологическая служба разработала соответствующие национальные руководства и стандарты в соответствии с национальными и региональными потребностями [2].

Водопользование может быть подразделено на учтенное и неучченное [3]. Ученное водопользование — это то, когда вода отводится или изымается из поверхностных или подземных источников и направляется к месту использования. Для того чтобы определить общее количество используемой воды — рассредоточенные водозаборы и городское водоснабжение — могут быть рассмотрены пять подтипов:

- a) изъятие воды: количество воды, отведенной или изъятой из поверхностных или подземных источников;
- b) поставка/выпуск: количество воды, поставляемой к месту использования и количество, высвобождаемое после использования;
- c) потери при переброске: количество воды, которое теряется на транзитном участке, например: от места изъятия до места потребления, от пункта забора до пункта сброса;
- d) безвозвратное водопотребление: часть воды, которая испаряется, расходуется на транспирацию или входит в состав продукции или урожая, в некоторых случаях безвозвратное водопотребление будет равняться разнице между объемом забранной и сброшенной воды;
- e) возвратный сток: количество воды, которое сбрасывается с объекта водопользования и становится доступным для дальнейшего использования.

К категории учтенного водопользования, рассмотренного в этой главе, относятся: городское, коммунальное, коммерческое, ирригационное, животноводческое, промышленное водоснабжение и потребление воды в энергетике. Каждая категория водопользования имеет различные возможности по повторному использованию возвратных вод. Эти возможности определяются качеством и количеством возвратных вод, которые имеются для последующего использования. Например, возвратные ирригационные воды могут быть загрязнены пестицидами и удобрениями. В результате интенсивного использования вод на орошение

концентрация минеральных веществ в возвратных водах часто существенно выше концентрации тех вод, которые были использованы для орошения. Следовательно, ирригационные возвратные воды часто имеют малый потенциал повторного использования. По этому показателю они значительно отличаются от самых больших по объему возвратных вод с теплоэнергетических объектов, для которых принципиальное изменение в свойствах воды заключается лишь в увеличении ее температуры после использования.

Неучтенное водопользование — это использование воды, не связанное с перебросками или заборами воды из поверхностных или подземных водных источников. В большинстве случаев количественно оценить такое использование весьма трудно. Однако из-за того что этот вид использования воды сопоставим с учтенным водопользованием и оказывает влияние на качество и количество водных ресурсов для всех видов водопользования, эффективная эксплуатация водных ресурсов требует, чтобы методы и подходы, разработанные для неучтенного водопользования, позволяли получать количественные оценки использования воды.

Виды неучтенного водопользования, о которых говорится в этой главе, включают: навигацию, снижение загрязнения, рекреацию, эстетический аспект водопользования, а также рыболовство и заповедники. Гидроэнергетика рассматривается в главе 56.

### 51.2.1 *Городское водоснабжение*

Под городским водоснабжением понимается изъятие воды государственными и частными водозаборами и ее направление к множеству потребителей для удовлетворения хозяйственных, коммерческих, промышленных нужд и потребностей теплоэнергетики [3]. Информация о городском водоснабжении может быть в основном получена от отдельных потребителей путем опросов по почте или персональных интервью. Данные должны включать сведения о численности обслуживаемого населения и количестве забираемой воды. Данные о поступлении воды от городских водозаборов к различным водопользователям получить более трудно и такая информация, как правило, менее надежна.

### 51.2.2 *Хозяйственно-бытовое водопользование*

Хозяйственно-бытовое водопользование связано с использованием воды в домашнем хозяйстве на нужды питья, приготовления пищи, мытья, стирки одежды, чистки посуды, смыва унитазов, полива газонов и садов [3]. Информация о распределении воды от городских систем водоснабжения к коммунальным водопользователям может быть получена в дирекции городского водоснабжения. Численность населения, пользующегося своими собственными системами водоснабжения (самообеспечение), может быть определена путем вычитания

числа людей, пользующихся городским водоснабжением из общей численности населения данного района. Коммунальные системы самообеспечения редко могут быть учтены и по ним существуют лишь некоторые данные. Изъятия воды такими системами можно оценить, используя коэффициент потребления воды на душу населения, исходя из разумного объема воды, используемого человеком в день на изучаемой территории.

#### 51.2.3 *Коммерческое водопользование*

Коммерческое водопользование связано с обеспечением водой мотелей, гостиниц, ресторанов, зданий офисов, других коммерческих предприятий, а также гражданских и военных организаций [3]. Информация о распределении воды от городских систем водоснабжения к коммерческим водопользователям может быть получена в дирекции городского водоснабжения. Во многих случаях оценки забора воды собственными системами водоснабжения (самообеспечения) могут быть основаны на численности населения коммерческих сфер обслуживания, т. е.: числа студентов, посещающих университет, числа заключенных в колонии, служащих в здании офиса или степени средней заполняемости гостиницы.

#### 51.2.4 *Орошение*

К категории ирригационного водопользования относится весь уровень воды, который искусственно подводится к фермам и садовым участкам, а также вода, используемая для орошения общественных и частных лугов, садов, и площадок для игры в гольф. Ирригационные воды могут поступать по системам самообеспечения или по ирригационным коллекторам, обслуживаемым компаниями или районами. Объем ирригационных вод, необходимый для производства урожая, зависит от ряда факторов, таких, как осадки и другие климатические условия, вид культуры, продолжительность периода вегетации, способ и режим полива, свойства почвы и т. д. В различных странах существуют несколько методов определения потребности растений в воде [1, 4], но они обычно применимы только в тех условиях, для которых разработаны. Руководящие указания по этому вопросу можно получить в Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО). Для учета характеристик мест ирригационного использования вод, в целях сбора необходимой информации может составляться специальная учетная форма [6]. Для крупных территорий и территорий, где измерения не могут быть произведены, оценки использования воды для ирригации также могут быть необходимы. В этом случае такие оценки могут быть выполнены с помощью косвенных методов, т. е.: статистических приемов, картирования землепользования, дистанционного зондирования — или путем комбинации этих методов [6].

Усилия, предпринимаемые в последние годы по эффективному использованию ирригационных вод, привели к поиску более действенных методов

ведения сельского хозяйства, включая: снижение норм полива и возвратных вод, улучшение качества воды и уменьшение финансовых затрат на ирригацию при поддержании или даже увеличении уровня продуктивности сельскохозяйственных культур.

#### 51.2.5 **Животноводство**

В животноводстве вода используется в связи с производством мяса, домашней птицы, яиц, молока, шерсти и развитием других видов животноводства, таких, как коневодство, кролеводство, звероводство и рыбоводство [3]. Фермы по разведению рыб занимаются, прежде всего, производством рыбных продуктов, контролируя процесс кормления, соблюдения санитарных правил и воспроизводства. Большая часть объема воды, используемой на таких фермах, требуется для поддержания необходимых уровней в пруду и качества воды.

Количество поверхностных и извлеченных подземных вод для использования в животноводстве может быть оценено, исходя из численности поголовья животных на рассматриваемой территории. Путем умножения числа животных каждого вида получают оценку водопотребления в целом. Водопотребление фермами по разведению рыб оценивается путем умножения площади пруда на соответствующий коэффициент, учитывающий скорость водообмена.

#### 51.2.6 **Промышленность**

В промышленности вода используется при обработке изделий для мытья и охлаждения [3]. К отраслям промышленности, которые являются основными потребителями воды, относятся: металлургическая, химическая с сопутствующими производствами и нефтеперерабатывающая. Информация о распределении воды от городских систем водоснабжения к промышленным пользователям может быть получена в дирекции городского водоснабжения. Объемы воды, забираемой частными промышленными водопользователями, могут быть оценены на основании отчетов отдельных заводов. Они довольно постоянны из года в год. Во многих случаях для промышленных целей требуется вода хорошего качества.

Статистические выборки в отношении промышленных водопользователей могут дать общее представление об использовании воды промышленным сектором. Важно отметить, что несколько крупных промышленных водопользователей, часто, определяют основной объем водопотребления. Например, в Соединенных Штатах самые крупные промышленные предприятия, составляющие лишь 3 % от общего числа всех промышленных предприятий, потребляют около 95 % воды, используемой в промышленности. Еще один косвенный способ оценки промышленного водопотребления может быть основан на установлении зависимостей между объемами используемой воды, объемами производимой продукции и ее видом.

### 51.2.7 *Тепловая энергетика*

В тепловой энергетике вода используется при производстве электрической энергии на тепловых атомных или геотермальных станциях [3]. Этот вопрос рассматривается также в разделе 56.3. Оценки требуемого количества воды для объектов теплоэнергетики должны быть достаточно надежными, так как большая часть потребителей электроэнергии пользуется услугами этих объектов. Основная часть воды, используемой объектами тепловой энергетики, идет на охлаждение конденсаторов и реакторов. Объекты теплоэнергетики весьма разнообразны в отношении технологических схем распределения охлаждающей воды после ее прохождения через конденсаторы. Меньше всего воды требуется, когда охлаждающая вода многократно циркулирует через охлаждающие башни (градирни) или пруды, но при этом более 60 % ее объема расходуется на испарение (безвозвратное водопотребление). В том случае, когда забранная для охлаждения вода используется только один раз, а затем возвращается в поверхностный водный источник, требуется значительно большее ее количество, однако испарение в этом случае невелико (менее 3 %). Оценки забора воды объектами теплоэнергетики обычно могут быть выполнены на основании данных о выработке энергии.

### 51.2.8 *Уменьшение загрязнения вод*

Качество воды многих рек — ниже желаемого, ввиду высоких концентраций загрязняющих веществ. Ситуация обычно обостряется во время засушливых периодов, когда возрастает соотношение между расходами загрязняющих веществ и речного стока. Поэтому для уменьшения загрязнения может требоваться повышение меженного стока, чтобы содержание в воде загрязняющих веществ не превышало максимально допустимого уровня. Разбавление случайных залповых сбросов загрязнителей высокими попусками из водохранилищ, может рассматриваться в качестве общепринятого средства снижения концентрации загрязняющих веществ.

### 51.2.9 *Рекреация, эстетическое и традиционное использование вод*

В мире есть много рек, особый режим стока которых желательно сохранить из-за их живописности, а также в рекреационных целях, исторического интереса, религиозного значения или других нематериальных интересов. Изменения режима стока таких рек могут вызвать серьезные возражения, поэтому водохозяйственные мероприятия должны планироваться и осуществляться очень продуманно.

Рекреационные требования обычно заключаются в том, чтобы качество воды было надлежащим, уровни и скорости течения были относительно постоянны при слабом волнении. Резкие изменения уровня воды могут быть в высшей степени нежелательны. Определить количество воды, используемой для этих целей, часто бывает весьма затруднительно.

### 51.2.10 *Охрана рыб, животного и растительного мира*

При рассмотрении требований к воде, используемой для охраны водных богатств, флоры и фауны, следует иметь в виду, что изменение режима стока может вызвать изменения в популяциях различных видов фауны и флоры. Для того чтобы ослабить неблагоприятные экологические воздействия и усилить позитивное влияние планируемого водохозяйственного мероприятия, всегда необходимо проводить консультации экспертов, если предусматриваются изменения в естественном режиме водного объекта. Оценка таких изменений является очень сложной задачей.

### 51.2.11 *Судоходство*

Требования, которые выдвигает судоходство, обычно сводятся к регулированию стока для поддержания минимально необходимой глубины и безопасной скорости течения, а также для обеспечения объемов воды, необходимых для шлюзования (раздел 57.1). В некоторых случаях требования к обеспечению судоходных глубин частично или полностью удовлетворяются дноуглубительными работами в руслах рек. Определить количество воды, необходимой для этих целей, зачастую достаточно трудно.

### 51.2.12 *Регулирование паводочного стока*

Регулирование паводков не связано с использованием воды, а требуется в основном для более равномерного перераспределения во времени речного стока. Это может быть частично достигнуто практикой применения различных приемов землепользования, таких, как лесонасаждения и поперечная распашка склонов. Одним из наиболее распространенных способов является снижение паводочных расходов путем накопления избыточных вод в водохранилищах. Основное противоречие между целями регулирования паводков и накопления воды в водохранилище рассматривается в разделе 47.3.

### **Список литературы**

1. Харченко С. И. *Гидрология орошаемых земель*. Л., Гидрометеоиздат, 1968.
2. Solley, W. B., Pierce, R. R. and Perlman, H. A., 1992: Estimated use of water in the United States in 1990. U.S. Geological Survey Circular 1081.
3. Tate, D. M., 1990: *Water Demand Management in Canada: A State-of-the-Art Review*. Social Science Series No. 23, Water Planning and Management Branch, Inland Waters/Lands Directorate, Environment Canada, Ottawa.
4. Food and Agriculture Organization/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1973: *Irrigation, Drainage and Salinity*. Hutchinson & Co, London.

5. Holland, T. W., 1992: Water-use data collection techniques in the southeastern United States, Puerto Rico, and the Virgin Islands. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4028*.
6. U.S. Department of the Interior, 1977 (1992): Water use. In: *National Handbook of Recommended Methods for Water-data Acquisition*.

## ГЛАВА 52

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА

#### 52.1       **Общие положения**

Анализ природной изменчивости речного стока может показать, что на данной реке часто наблюдается низкий сток, которого будет недостаточно для удовлетворения потребностей в воде отдельных водопользователей. Низкий сток можно увеличить за счет воды, накопленной в водохранилище. Эффективность водохранилища зависит в первую очередь от интенсивности водопотребления, называемой попуском из водохранилища  $D$ , полезной емкости водохранилища  $S$  и характера распределения стока во времени. Зависимость между полезной емкостью водохранилища, попуском из него и требуемой надежностью  $R$  в отношении запаса воды часто называется уравнением аккумуляции [6]. При проектировании водохранилища любые две из этих трех переменных могут рассматриваться как независимые, и их значения могут быть заданы. Величина третьей переменной может быть рассчитана по уравнению аккумуляции для данного гидрологического режима. Существуют несколько методов для решения уравнения аккумуляции в зависимости от вида представления режима притока, например: ряд исторических данных или смоделированный искусственный ряд, в виде вероятностных свойств процесса притока воды и кривых обеспеченности притока.

Обычной задачей при проектировании водохранилищ для регулирования низкого стока является определение полезной емкости водохранилища, необходимой для обеспечения заданного режима попуска, и с заданной надежностью, которая сводится к решению уравнения аккумуляции следующего вида:

$$S = f(D, R), \quad (52.1)$$

где  $R$  выражается либо в процентах времени бесперебойной работы, либо в виде риска того, что в работе могут случаться перебои в какой-либо год или какие-либо отдельные периоды, либо в виде объемов фактического водопотребления в течение заданного периода, выраженных в процентах от требуемого количества воды.

Можно принять самое простое решение, если надежность обеспечения водой на весь проектируемый период считать равной 100 %, т. е. не предполагается

каких-либо перебоев в водоснабжении. Хотя на практике такие случаи никогда не встречаются, такой подход из-за его простоты часто используют на стадии предварительных расчетов.

В более реальном случае, когда надежность обеспечения водой — менее 100 % для расчетного периода, уравнение (52.1) не имеет прямого решения. Наиболее распространенное решение заключается в применении метода последовательного приближения при решении уравнения аккумуляции вида  $R = f(D, S)$ . При таком решении одна из независимых переменных принимается постоянной, а другая подбирается до тех пор, пока не будет получено требуемое значение  $R$ .

Во многих случаях величина  $R$  непосредственно не определяется, а используется другой критерий эффективности работы водохранилища, например: максимальная ожидаемая экономическая выгода, минимальный ожидаемый экономический ущерб. Однако проблемы такого типа выходят за рамки данной главы. Подходы к их решению изложены Маассом и др. в *Design of Water-resources Systems* [12] (Проектирование водохозяйственных систем).

## 52.2        **Оценка потерь воды из поверхностных водных систем**

### 52.2.1      **Природа потерь**

Потери воды, т. е. испарение и фильтрация, оцениваемые на предварительной стадии проектирования, проявляются в данных о речном стоке, используемых при оценке запасов воды в водном объекте. Сооружение новых водохранилищ и каналов часто сопровождается дополнительным испарением и инфильтрацией. Оценки этих потерь могут быть основаны на данных измерений на существующих водохранилищах и каналах. Измеренные приток, отток и изменение объема балансируются с учетом суммарных потерь.

При определении водного баланса фильтрация и инфильтрация не рассматриваются как потери, т. к. они учитываются в виде расхода подземных вод или расхода реки в нижнем бьефе, проходящего через водопропускное сооружение. Тем не менее они должны рассматриваться как потери, поскольку на предварительной стадии проектирования именно потери представляют интерес, например, расход воды на фильтрацию обуславливает потери при выработке электроэнергии или при заборе для водоснабжения. Таким образом определение «потери» является более понятным применительно к водохозяйственной практике, чем с гидрологической точки зрения.

Слой воды, испаряющийся ежегодно с поверхности водохранилища, может изменяться от примерно 400 мм в холодном, влажном климате до более чем 2 500 мм в жарких, засушливых регионах. Следовательно, испарение является важным фактором во многих проектах и заслуживает серьезного внимания.

Потери за счет фильтрации из водохранилищ, а также из ирригационных и навигационных каналов могут быть значительными, если эти сооружения расположены в области расположения водопроницаемых пород. Мероприятия по снижению фильтрационных потерь могут быть дорогими, а возникающие технические трудности при их осуществлении могут сделать проект неосуществимым.

### 52.2.2 *Потери с орошаемых территорий*

Потери воды в ирригационных системах некоторое время могут быть больше того количества воды, которое реально потребляется растениями. Эти потери представляют собой излишки воды, образовавшейся за счет задержания воды на поверхности земли, просачивания подземных вод, испарения с почвы, транспирации непродуктивной растительности, а также фильтрации и испарения с каналов. От 20 до 60 % воды, теряемой при ирригации, может превратиться в возвратный сток и пополнить речной сток или подземные воды. Концентрация химических веществ в возвратных водах обычно более высокая, чем в исходной воде. Они могут также содержать дополнительные вредные вещества.

Потери на испарение с водной поверхности и почвы могут быть оценены различными методами, которые рассмотрены в работе [3]. Фильтрация и просачивание могут быть определены по данным полевых наблюдений за уровнями подземных вод на малых опытных или экспериментальных оросительных системах, расположенных в пределах интересующей территории, или методом водного баланса.

### 52.2.3 *Испарение с водохранилищ*

Методы оценки испарения с водохранилищ по данным испарителей и по метеорологическим данным описаны в главе 37. В случае отсутствия данных испарителей или соответствующих метеорологических данных в близлежащих от водохранилища пунктах для определения испарения с водохранилищ используются региональные оценки этих характеристик.

До затопления территории водохранилищем потери с нее определялись испарением с суши. При проектировании водохранилища необходимо оценить дополнительные потери воды с площади затопления, т. е. разницу между испарением с водной поверхности и поверхности суши, затопленной водохранилищем. Прямые измерения испарения с суши связаны с решением многочисленных трудноразрешимых проблем [1, 3–5]. Косвенные методы оценки суммарного испарения описаны в разделе 9.5.

Всякий раз при проектировании водохранилища необходимым является определение соотношения между площадью поверхности реки при минимальном уровне и объемом воды в ней при выборе местоположения плотины. Обширные исследования были выполнены с целью снижения испарения с воды путем

распространения на поверхности воды мономолекулярных пленок. Однако основные проблемы, связанные с применением этих методов для больших водоемов, остаются пока нерешенными [7]. Термическая стратификация водохранилища и различие в температурах воды притока и оттока могут оказывать значительное влияние на испарение с водохранилища.

#### 52.2.4 *Фильтрация из водохранилища*

Фильтрация из водохранилищ зависит от структуры и проницаемости подстилающих дно водохранилища пластов и от местных условий. Оценка ожидаемой фильтрации может быть получена на основании данных о фильтрации по существующим водохранилищам, по данным геологических исследований в месте проектирования, а также по соотношению площадь фильтрации—глубина для проектируемого водохранилища. По окончании строительства и сбора данных о стоке и других характеристиках фильтрация или суммарные потери могут быть оценены и может быть получена зависимость скорость фильтрации—глубина.

#### 52.3 *Влияние местоположения водохранилища*

Пункт сброса или использования воды расположен на водохранилище или вблизи него, количество воды, сбрасываемое в водохранилище, может рассматриваться как приток, в то время как водопотребление и потери воды могут рассматриваться как необходимый попуск из водохранилища. Однако, если водохранилище расположено выше по течению, то приток в него будет определяться только расходом воды в русле реки. Определение полезного объема водохранилища должно быть основано на проектных требованиях по водопользованию за вычетом того количества воды, которое может поступать в водохранилище в виде неучитываемого стока с орошаемых площадей, расположенных между водохранилищем и пунктом наблюдений за речным стоком.

Процедура, описанная выше, применяется специально в случае, когда водохранилище расположено в месте использования воды. Однако после доработок такие процедуры могут также быть применены и для большинства других случаев.

#### 52.4 *Влияние осаждения наносов*

Осаждение наносов в водохранилище приводит к постепенному уменьшению его полезного объема. Если скорость осаждения небольшая по сравнению с емкостью водохранилища, то среднегодовой объем наносов может рассматриваться в качестве постоянной величины ежегодного уменьшения емкости водохранилища. Если наблюдается большой объем наносов, то уменьшение емкости водохранилища должно рассчитываться по притоку или по величине поступления наносов за каждый паводок. Более детально вопросы переноса наносов рассматриваются в главе 13.

## 52.5 Последовательный анализ

Временные ряды, используемые при проектировании водохранилищ, могут представлять собой либо фактические данные наблюдений за речным стоком, либо данные наблюдений, приведенные к многолетнему периоду по данным рек-аналогов или наблюдениям за атмосферными осадками (раздел 32.3.3), либо синтезированные серии данных по притоку в водохранилище (раздел 39.6). Наиболее часто в расчетах стока при проектировании водохранилищ используются ряды среднемесячных, декадных или среднесуточных расходов.

### 52.5.1 Численные методы

Расчет численными методами лучше всего осуществлять в табличной форме, как показано в таблице 52.1. Расчеты могут быть выполнены для некоторых принятых для водохранилищ начальных условий, например, начинать расчет с опорожненного или наполненного водохранилища, или для условий так называемого устойчивого (стационарного) состояния, когда исходный запас воды равен объему воды в водохранилище в конце проектного периода. В данном случае расчет начинается с произвольно заданного объема, а затем повторяется, принимая за начальный объем то значение, которое было получено в качестве конечного на первом шаге. Результаты второго шага расчетов отражают условия устойчивого состояния.

Таблица 52.1 показывает часть расчетов для случая, когда при полезном объеме водохранилища  $S = 300 \times 10^6 \cdot \text{м}^3$  реальный объем изменяется от  $S_{min} = 2,0 \times 10^6 \cdot \text{м}^3$  до  $S_{max} = 2,3 \times 10^6 \cdot \text{м}^3$ . Можно предположить, что минимальный объем необходим для обеспечения, например судоходных глубин, в то время как максимальный объем не должен быть превышен из-за опасности повреждения береговых откосов. Таким образом, всякий раз, когда осуществление полного попуска из водохранилища должно приводить к снижению его объема ниже  $2 \times 10^6 \cdot \text{м}^3$ , отток из водохранилища должен быть снижен до такой степени, чтобы не допустить такой ситуации. Аналогично этому при осуществлении попуска, приводящего к росту объема водохранилища выше  $2,3 \times 10^6 \cdot \text{м}^3$ , сброс должен быть увеличен настолько, чтобы предотвратить такое увеличение.

В рассматриваемом примере величина попуска воды изменяется в зависимости от сезона (графа 7 таблицы). Приток воды в водохранилище представлен месячными значениями (графа 6). Месячными значениями (в мм) представлены также осадки и испарение (графы 2 и 4).

Объемы осадков  $P$  и испарения  $E$  (графы 3 и 5 соответственно) для рассматриваемых месяцев рассчитаны с использованием площади водной поверхности водохранилища на конец предшествующего месяца (графа 11). Каждая строка таблицы представляет собой решение уравнения водного баланса водохранилища для конкретного месяца, т. е. решение уравнения аккумуляции

Таблица 52.1  
Последовательный расчет емкости водохранилища

Год, Месяц	Осадки, Р		Испарение, Е		Приток, I		Водозабор, D	Отток, О	Изменение запасов воды, ΔS	Запас воды на конец месяца, S	Площадь зеркала водохранилища км <sup>2</sup>	Сброс через водосливную плотину 10 <sup>3</sup> .м <sup>3</sup>	Дефицит воды 10 <sup>3</sup> .м <sup>3</sup>
	мм	10 <sup>3</sup> .м <sup>3</sup>	мм	10 <sup>3</sup> .м <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> .м <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> .м <sup>3</sup>							
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1954													
.													
Сентябрь	40	22	90	50	20	150	150	-158	2 254	0,56	0	0	
Октябрь	50	27	70	38	20	80	80	-71	2 096	0,54	0	0	
Ноябрь	40	21	50	26	20	50	40	-25	2 025	0,53	0	0	10
Декабрь	50	26	30	16	30	30	30	+10	2 000	0,52	0	0	
									-----				
1955													
Январь	40	21	30	16	20	20	20	+5	2 010	0,53	0	0	
Февраль	60	32	40	21	30	20	20	+21	2 015	0,53	0	0	
Март	80	42	50	26	50	20	20	+46	2 036	0,53	0	0	
Апрель	90	49	70	38	160	20	20	+51	2 082	0,54	0	0	
Май	70	38	90	50	140	20	61	+67	2 233	0,55	0	0	
.									-----				

$$S_i = S_{i-1} + I_i + P_i - E_i - O_i = S_{i-1} + \Delta S_p \quad (52.2)$$

где отток  $O_i$  равен водозабору  $D_i$  с учетом ограничения  $S_{min} \leq S_i \leq S_{max}$  (значения  $P$  и  $E$  берутся из колонок 3 и 5).

Нарушение нижнего предела предотвращается снижением оттока на величину  $S_{min} - S_p$ , которая обозначается как дефицит воды (графа 13, ноябрь). Если убрать нижний предел  $S_{min}$ , то водохранилище становится полуопределенным, как бы «бездонным». Такой прием используется для определения полезного объема водохранилища, необходимого для предотвращения нехватки воды в целях водоснабжения по продолжительным рядам притока, т. е. для  $R = 100\%$ . Этот объем должен соответствовать максимальному объему опорожнения, зарегистрированному в течение расчетного периода. Превышение верхнего предела предотвращается увеличением оттока на величину  $S_t - S_{max}$ , которая характеризует сброс через водослив (графа 12, май).

После завершения расчетов дефициты воды используются для определения требуемой меры надежности  $R$ . Значение  $R$ , вместе с первоначальными значениями  $S$  и  $D$ , дают одно решение уравнения аккумуляции для отдельного входного ряда. Поскольку одна и та же пара величин  $S$  и  $D$  может привести к получению различных значений  $R$  для различных входных рядов, значение  $R$ , полученное на основе исторических данных, может не быть репрезентативным на перспективу. В этой связи лучше будет выполнить расчеты  $R$  для числа (по меньшей мере 50) синтезированных входных рядов, и в качестве расчетного значения взять их среднее значение. При необходимости получения границ доверительного интервала  $R$ , следует рассчитать, по меньшей мере, тысячу ее значений. В этом случае объем расчетов будет очень высок, поэтому табличная форма должна быть компьютеризирована. Удобство использования компьютера делает метод численных временных рядов наиболее гибким и единственным средством при проектировании водохранилищ [6, 8].

### 52.5.2 Графические методы

При известных притоке  $I$  и оттоке  $O$  объем воды в водохранилище  $S$  за время  $t$  математически выражается уравнением

$$S_t = S_o + \int_o^t (I - O) d\tau = S_o + \int_o^t Id\tau - \int_o^t Od\tau = S_o + I_t^* - Q_t^*. \quad (52.3)$$

Графики интегральных сумм  $I^*$  и  $O^*$  представляют собой соответственно интегральные кривые притока и оттока воды, а  $S_o$  является начальным запасом воды в водохранилище. Таким образом из уравнения (52.1) становится понятным, что объем накопленной воды равняется разнице между интегральными кривыми притока и оттока. Пример такого подхода представлен на рисунке 52.1, согласно

которому полезный объем водохранилища  $S$  определен для постоянного попуска  $D$  при условии, что водоснабжение будет бесперебойным в течение всего расчетного периода. Этот метод исходит из предположения полуопределенного (бездонного) водохранилища, упомянутого в разделе 52.2.1, и характеризует требуемый объем воды как минимальный объем опорожнения, зарегистрированный с начала наполнения водохранилища и в течение всего расчетного периода. Для облегчения расчетов применяется следующий графический прием. Постоянный попуск соответствует постоянному наклону интегральной кривой  $D^*$ . Линия, параллельная  $D^*$ , проведена через каждый пик на интегральной кривой притока  $I^*$ . Необходимый запас воды  $S$  равен максимальному вертикальному расстоянию между любой точкой на кривой  $I^*$  и соответствующей ей точкой на любой из линий, параллельных  $D^*$ .

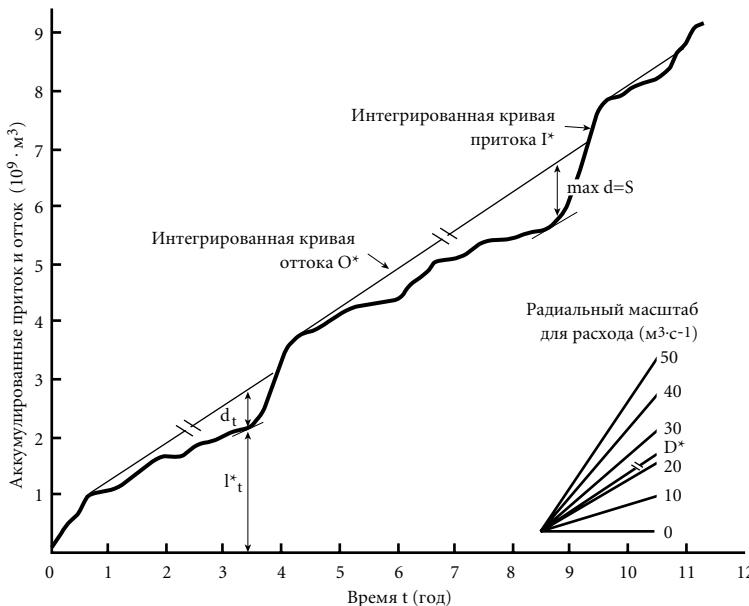


Рисунок 52.1 — Применение интегральных кривых для определения емкости водохранилища

## 52.6 Вероятностные методы

Если речной сток рассматривать как стохастический процесс, то каждая реализация этого процесса, например каждый временной ряд, подчиняется тем же

вероятностным свойствам, которые присущи данному процессу. Если эти свойства относительно просты, то их можно использовать и для непосредственного расчета условий работы водохранилища без моделирования временных рядов. Методы расчета работы водохранилища с использованием моделированных рядов исходных данных условимся называть строгими; методы, в которых не учитывается вероятностная последовательность величин внутри ряда, а рассматривается только вероятностное распределение исходных данных, будем называть приближенными. Иногда упомянутые методы соответственно называются стохастическими и вероятностными [9].

### 52.6.1 *Строгие методы*

Для моделирования процесса притока речных вод разработаны только два стохастических метода — модель случайной выборки и авторегрессионная модель первого порядка [10]. Проблема формулируется в виде  $R = f(D, S)$ . Общая последовательность расчетов такая: объем водохранилища разделяется на  $k$  слоев  $\Delta S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ , так, что  $S = \sum \Delta S_i$ . Каждый слой представлен одним значением  $S_i$ , обычно отнесенным к середине слоя. Целью вычислений является нахождение распределения вероятностей объемов  $S_1, S_2, \dots, S_k$  для заданных значений  $S$  и  $D$ . Характеристика надежности определяется на основании этого распределения. При нахождении такого распределения преимущество состоит в том, что при любом первоначальном запасе воды в водохранилище распределение вскоре достигает равновесия или устойчивого состояния, независимо от начального объема. Следовательно, достаточно найти распределение объемов для любого момента времени  $t_m$  равновесного состояния процесса с помощью первого установления условной вероятности, при котором водохранилище будет находиться в данном состоянии  $S_p$ , если оно было в состоянии  $S_j$  в момент времени  $t_{m-1}$  для каждого состояния запаса воды во время  $t_m$ . Такая вероятность называется вероятностью перехода  $p_{ij}$  и может быть определена на основании распределения вероятностей притока и величины  $D$ . Зная все вероятности переходов, можно рассчитать вероятность  $P_i^{(m)}$  состояния водохранилища  $S_i$  в момент  $t_m$  по уравнению

$$P_i^{(m)} = P_1^{(m-1)} p_{i1} + P_2^{(m-1)} p_{i2} + \dots + P_k^{(m-1)} p_{ik}. \quad (52.4)$$

Такое уравнение записывается для каждого накопления  $i = 1, 2, \dots, k$ . Этот вид анализа может применяться только в том случае, если для описания процесса притока речных вод, представленного рядами годовых, сезонных или месячных значений стока, приемлемы модели либо случайной выборки, либо авторегрессии первого порядка.

### 52.6.2 *Приближенные методы*

При проектировании наливных водохранилищ, предназначенных для обеспечения относительно низких допусков, часто требуется детальное представление во времени процесса притока. Такое представление обеспечивается характерными рядами ежедневных расходов воды сложной стохастической структуры, которая препятствует использованию строгих вероятностных методов. В таких случаях единственной альтернативой применения подходов, основанных на моделировании временных рядов, является использование приближенных вероятностных методов, которые применяются на предварительной стадии планирования и проектирования. В наиболее распространенных вероятностных методах применяются повторяемости низких расходов и объемов стока, и они основаны на предположении, что засушливые периоды разделяются периодами с высоким стоком, достаточными по объему воды для заполнения водохранилища, перед тем как начнется новый маловодный засушливый период.

Тот факт, что минимальные расходы часто наблюдаются в течение какого-то одного периода года и редко прерываются высоким стоком, позволяет пренебречь фактическим порядком их следования и найти приблизительную регулирующую емкость, необходимую для увеличения минимальных расходов до некоторого постоянного уровня  $D$ , определяемого по кривой продолжительности (раздел 35.2). Регулирующая емкость определяется в виде объема, представленного площадью клина, ограниченного частью кривой продолжительности, для которой величина стока — ниже величины  $D$ , а линия определяется стоком, равным величине  $D$ . Оценка риска при расчете емкости, необходимая для условий сезонной засухи, может быть сделана с использованием кривых обеспеченности низкого стока (раздел 35.3). Например, если ежесуточный средний расход ниже  $5 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  допускается в среднем лишь один раз в четыре года, то необходимая емкость может быть определена по рисунку 35.1.

Кривые продолжительности суточных расходов и кривые повторяемости низкого стока не должны использоваться при расчетах для временных водотоков. Для таких рек, а также для рек с высокими расходами, более приемлемыми являются кривые обеспеченности расходов определенной продолжительности. Например, если требуемый забор воды из реки составляет  $3 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , то может быть рассчитан объем воды в водохранилище 80 %-й обеспеченности по рисунку 52.2.

Объем воды, имеющейся для забора данного расхода, удобнее всего определять по кривым обеспеченности объемов определенной продолжительности. Этот метод может также использоваться для предварительной оценки объема накопления воды в водохранилище, предназначенном для

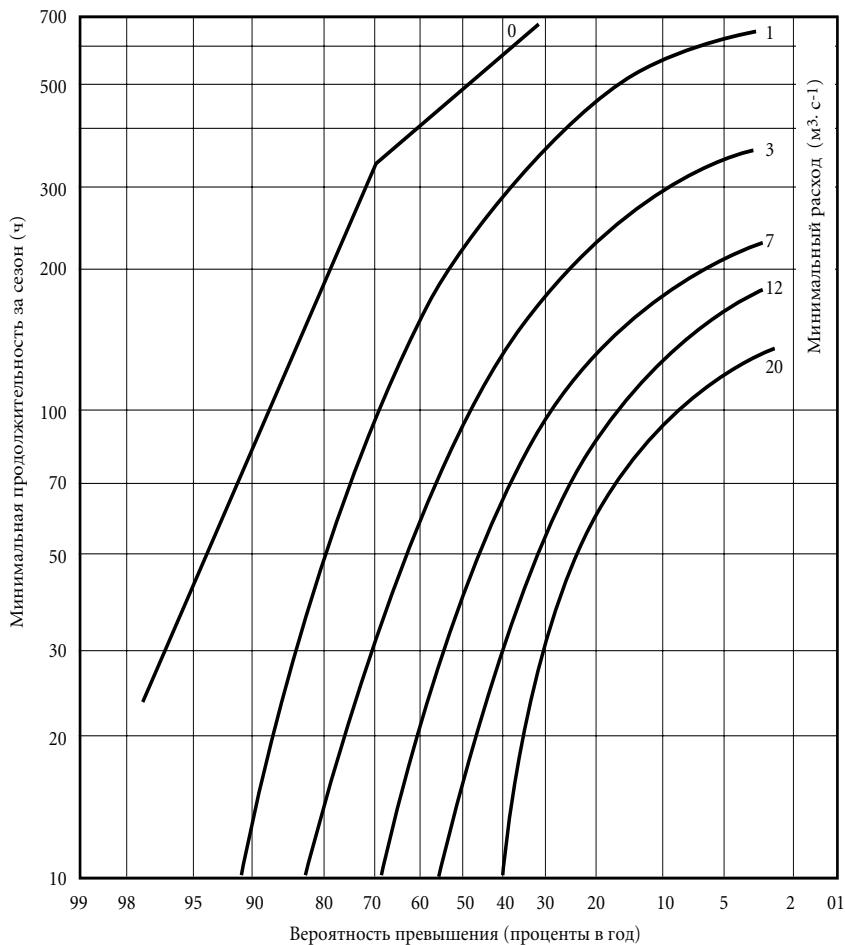


Рисунок 52.2 — Кривые обеспеченности расходов воды различной продолжительности

регулирования паводков. Таким образом, например, если ежедневные расходы воды выше  $100 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  допустимы в среднем один раз в пять лет (т. е. вероятность превышения — 20 %), требуемый объем задержания воды может быть определен с помощью рисунка 52.3.

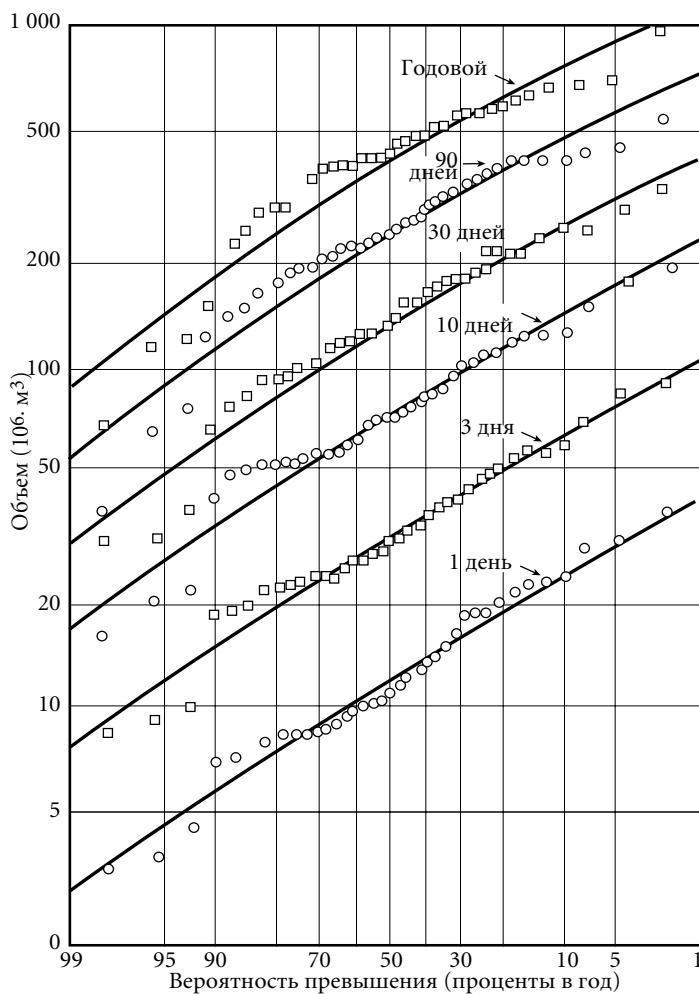


Рисунок 52.3 — Кривые обеспеченности объемов забираемой воды как функции расходов различной продолжительности

52.7

### Связь объема водохранилища с величиной забора воды и надежностью работы

Для того чтобы облегчить сравнение и оценку экономической эффективности различных вариантов проектируемых водохранилищ, можно получить решение

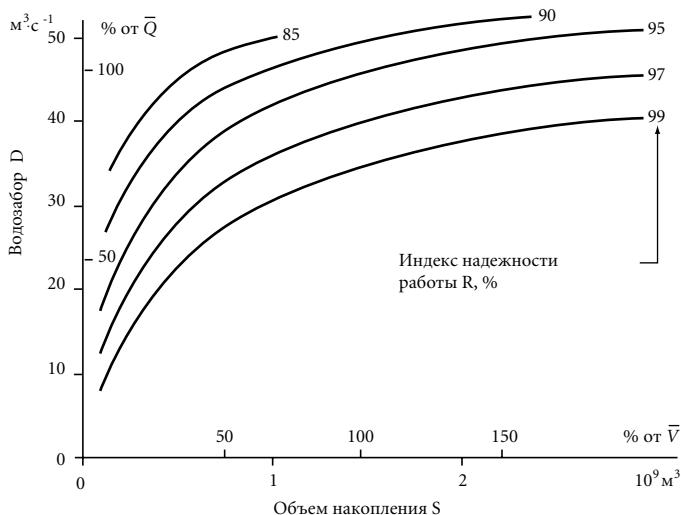


Рисунок 52.4 — Кривые зависимости между объемом водохранилища и водозабором из него

уравнения аккумуляции (52.1) для широкого диапазона значений трех его переменных и представить полученные решения в наглядном виде. Чаще всего с этой целью для створа проектирования строится график забора воды как функция объема накопления воды в водохранилище, используя характеристики надежности его работы в качестве параметра. Такие связи могут быть еще более общими, если выразить расход забираемой воды и объем накопления в виде отношения к среднегодовому объему притока (рисунок 52.4).

## 52.8 Многоцелевые водохранилища

Большинство водохранилищ предназначены для решения многих задач, перечисленных в разделе 47.2. Обычно нереально выделять определенную часть объема водохранилища для решения каждой отдельной задачи. В большинстве случаев такое целевое распределение объема ограничивается только аварийными ситуациями. Например, буферная зона чаще всего располагается непосредственно над зоной мертвого объема водохранилища и сохраняется для использования в исключительных обстоятельствах, таких, как непредвиденные сбросы воды в нижний бьеф для разбавления случайных загрязнений, для аварийного водоснабжения населения в случае неожиданной опасности для здоровья, для противопожарных нужд. Точно так же в водохранилищах для регулирования паводков может создаваться незаполненная аварийная емкость для

предотвращения перелива воды через гребень плотины. Однако большинство целей удовлетворяются за счет основной емкости водохранилища, что связано с разработкой сложных диспетчерских графиков его работы. Попуски воды из водохранилища часто выражаются в виде кривых графика, которые определяют величину попусков в зависимости от имеющегося запаса воды в водохранилище и времени года. Примеры диспетчерских графиков представлены Боксом и Дженкинсом в *Time Series Analysis: Forecasting and Control* [11] (Анализ временных рядов: предсказание и контроль) и Сванидзе в работе *Математическое моделирование гидрологических рядов* [2].

Для проектирования и функционирования многоцелевых водохранилищ необходимо проведение комплексного анализа, который, как правило, осуществляется с помощью итерационных методов, включающих построение диспетчерских графиков и оценку экономической эффективности использования водохранилища для каждой индивидуальной цели, с целью улучшения всей системы управления водным хозяйством. В этих случаях классическая надежность зависимости запас—забор воды может служить лишь в качестве первого приближения к стратегии управления, которая затем значительно улучшается. Различные методы оптимизации представлены в [12].

### 52.9 Системы водохранилищ

При проектировании системы водохранилищ используются в основном те же методы, что и при проектировании многоцелевых водохранилищ. Поскольку существуют сложные взаимоотношения между компонентами системы, а также между ресурсами воды и требованиями по ее использованию в различные периоды и на различных участках системы, прямое решение задачи по выбору режима системы обычно неосуществимо. Поэтому, в начале разработки проекта выбирается инженерное решение, которое затем совершенствуется путем последовательных приближений.

Водохранилища в бассейне реки сначала не проектируются как система, поскольку первоначально проекты каждого отдельного водохранилища часто разрабатываются для конкретной цели. По мере того как возрастает использование водных ресурсов речного бассейна, возникает необходимость исследовать работу всех сооружений как единую систему и дополнять ее время от времени новыми сооружениями. В этом случае условия эксплуатации существующих сооружений могут меняться, но осуществить коренные изменения обычно бывает трудно из-за многочисленных юридических, политических, экономических и физических ограничений. В соответствии с этим и уровень оптимизации, который может быть достигнут, как правило, достаточно низкий.

На любой стадии проектирования системы водохранилищ все проекты новых сооружений по аккумуляции воды должны рассматриваться особенно тщательно для того, чтобы определить порядок, в котором желательно осуществлять

реализацию различных проектов. Этот порядок определяется сопоставлением затрат на увеличение водоснабжения. В связи с ростом спроса на системы водохранилищ, необходимо лишь определить, когда следует начинать осуществление следующего наиболее желательного проекта. Детальные расчеты по снабжению водой многочисленных потребителей с учетом их потребностей требуют особого внимания в отношении устойчивости различных статистических и физических взаимосвязей между переменными для всех рассматриваемых источников водоснабжения. Некоторые связанные с такими расчетами методы моделирования можно найти в работах [2, 11].

#### 52.10        **Побочные эффекты от сооружения водохранилищ**

##### 52.10.1      ***Влияние на гидравлический и гидрологический режимы***

В результате сооружения водохранилища изменяются гидравлический и гидрологический режимы нижнего бьефа. Использование воды потребителями снижает средний сток реки, в то время как в результате регулирования стока водохранилищем изменяется его сезонное распределение и обычно уменьшается изменчивость стока. Задержка воды в водохранилище создает условия для седimentации, в результате чего спускаемая вода — чище поступающей, что может способствовать эрозии на участках нижнего бьефа. Уменьшение уклона реки может вызвать проблемы подтопления и осаждения наносов в русле реки, выше водохранилища.

##### 52.10.2      ***Влияние на окружающую среду***

Воздействия на окружающую среду являются предметом все большего внимания при планировании и эксплуатации водохозяйственных объектов и управлении ими. Создание водохранилищ обычно оказывает очень большое воздействие на экологические условия окружающей территории. В случае, когда объем водохранилища превышает объем годового стока, значительную роль в формировании качества воды в нем может играть эвтрофикация из-за большой продолжительности водообмена. Водохранилище оказывает большое влияние на температуру и содержание кислорода в сбрасываемой воде. Регулирование стока будет также изменять характер землепользования на нижележащих участках. Увеличение водопользования обычно приводит к увеличению объема сточных вод, которые могут снижать качество воды в реках-приемниках.

Изменения такого характера являются основными при создании водохранилищ. Однако водохранилища вызывают также изменения, приводящие к положительному эффекту. Во многих случаях состояние окружающей среды вблизи водохранилищ и в нижнем бьефе значительно улучшается за счет проведения рекреационных, эстетических, экологических и санитарных мероприятий. Прежде всего, важно постоянно оценивать все изменения факторов окружающей среды

под воздействием водохранилища и обеспечить средства для мониторинга показаний окружающей среды как до, так и после строительства водохранилища.

### **52.11      Определение максимальных уровней воды водохранилища**

Водохранилища должны проектироваться на уровни воды, несколько превышающие уровень, который может быть достигнут при максимальном паводке. Это и является мерой предосторожности против ветрового нагона, волнения и периодических колебаний водной поверхности (сейш). Этот запас высоты плотины не может рассматриваться как дополнение к полезному объему водохранилища, хотя это уменьшает опасность против паводков, больших, чем максимальный расчетный паводок. Большой запас высоты надводной части обычно обеспечивается для земляных плотин, особенно в районах, подверженных землетрясениям или воздействию сильных морозов.

#### **52.11.1    Ветровой нагон**

Ветровой нагон представляет собой скопление воды у наветренного берега и снижение уровня воды у подветренного берега водохранилища под воздействием ветра. Нагоны значительно сильнее выражены на мелководных участках, чем в глубоководной зоне. Высота нагона может быть определена по следующему уравнению:

$$H_s = \frac{ku^2 \ln \cos \theta}{gd}, \quad (52.5)$$

где  $H_s$  — высота подъема уровня воды при нагоне над спокойной водной поверхностью;  $u$  — скорость ветра, измеренная на высоте 10 метров над спокойной водной поверхностью;  $l$  — длина разгона или протяженность по прямой свободной водной поверхности, подверженной воздействию ветра;  $n$  — безразмерный коэффициент, зависящий от конфигурации и гидографии озера;  $\theta$  — угол между направлением ветра и линией, вдоль которой измерялся нагон;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $d$  — средняя глубина водоема по направлению действия ветра;  $k$  — безразмерный коэффициент сопротивления сдвигу. Уравнение (52.5) действительно для любой системы единиц. Для озер одинаковой глубины, близких по форме к прямоугольнику,  $n = 1$  и  $k = 1,45 \times 10^{-6}$ , поэтому  $u \leq 880d(g/l \cos \theta)$ . Для скорости ветра, больше указанной, ветровой нагон, рассчитанный по уравнению (52.5), будет выше, чем в реальности.

#### **52.11.2    Волны, вызванные ветром**

Ветры, дующие вдоль водохранилища, также образуют волны, которые в конечном счете достигают берегов и лицевой поверхности плотины. Поэтому необходим определенный запас надводной части плотины, чтобы предотвратить перелив воды через ее гребень при волнении. Высота волнового нагона является функцией

высоты и длины волны и угла откоса плотины. Высота волн, вызванных ветром на мелководье, может быть рассчитана по формуле

$$H_s = \frac{0,283u^2}{g} \tan h \left[ 0,578 \left( \frac{gd}{u^2} \right)^{0,75} \right] \tan h \left\{ \frac{0,0125 \left( \frac{gl}{u^2} \right)^{0,42}}{\tan h \left[ 0,578 \left( \frac{gd}{u^2} \right)^{0,75} \right]} \right\}, \quad (52.6)$$

где  $H_s$  — эффективная высота волны (средняя высота каждой третьей из наибольших волн);  $u$ ,  $d$ ,  $l$  и  $g$  обозначены в разделе 52.11.1. Таблицы функции  $\tan(x)$  приводятся в стандартных справочниках по математике. Уравнение (52.6) позволяет получить начальную высоту волны до того, как она испытывает отражение или рефракцию в пределах водохранилища.

При проектировании водохранилища обычно основываются на данных о ветре, полученных на материковых станциях с линией разгона по направлению к месту определения высот волн. Определение поля ветра над озером по данным наблюдений за ветром на суше является наиболее сложной метеорологической проблемой. Соотношение между скоростями ветра над сушей и над озером зависит от устойчивости воздушной массы над озером, которая обусловлена различием температур водной поверхности и прилегающего слоя воздуха. Оно также зависит от шероховатости подстилающей поверхности в месте расположения метеорологической станции. Таблица 52.2 [13] иллюстрирует приближенные значения этого соотношения.

Волны становятся критическим фактором только тогда, когда водохранилище почти заполнено до уровня полного объема. Таким образом следует учитывать только те ветры, которые могут наблюдаться в периоды максимального стояния уровня воды. Высота над спокойным уровнем водоема, до которого будет подниматься вода в результате воздействия волн, называется нагоном. Эта высота зависит от наклона плотинной стенки и крутизны волны и может быть оценена из диаграмм, представленных Сэвиллем и др. в работе *Freeboard Allowances for Waves in Inland Reservoirs* [14] (Расчет надводного борта водохранилища с учетом волнения).

### 52.11.3 *Периодические колебания поверхности*

В замкнутых водоемах, таких, например, как водохранилище, колебательные движения водной поверхности могут быть вызваны либо изменениями притока или оттока, действием ветра, внезапными изменениями атмосферного давления, либо землетрясениями. В зависимости от физико-географических характеристик водохранилища эти волны могут быть отражены либо от берегов, либо от мест резкого изменения ширины или глубины водохранилища. В длинном узком водоеме серия стоячих волн может создать несколько узлов.

Не существует надежного метода для расчета высоты волн, вызванных внезапными изменениями атмосферного давления или землетрясением. Общее превышение надводной части плотины для учета таких явлений может меняться от нескольких сантиметров до одного и более метров в зависимости от размеров и значимости водохранилища. Высота волны, обусловленной внезапным изменением притока в водохранилище или оттока из него, может быть приблизительно определена по уравнению

$$H_a = \frac{\Delta q}{bv}, \quad (52.7)$$

где  $H_a$  — высота волны выше или ниже уровня спокойной воды;  $\Delta q$  — изменение величины притока воды в водохранилище или оттока из него;  $b$  — ширина поверхности водохранилища в месте образования русла;  $v$  — скорость распространения волны.

Таблица 52.2  
Поправки к скорости ветра, определяемой береговыми станциями

<i>Направление ветра</i>	<i>Местонахождение станции</i>	<i>Соотношение*</i>
К берегу	Удалена на 5–75 км от берега	1,0
К берегу	Прибрежная	0,9
К берегу	На острове, удаленном на 12,5–25 км от берега	0,7
От берега	Прибрежная	0,7
От берега	Удалена на 25 км	1,0

\* Отношение скорости ветра над сушей к скорости ветра над поверхностью воды (обе — на высоте 10 метров).

### Список литературы

1. Всемирная Метеорологическая Организация, 1990: *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений*. Пятое издание, ВМО-№ 8, Женева.
2. Сванидзе Г. Г. *Математическое моделирование гидрологических рядов*. Л., Гидрометеоиздат, 1977.
3. World Meteorological Organization, 1958: *Measurement of Evaporation, Humidity in the Biosphere and Soil Moisture* (N. E. Rider). Technical Note No. 21, WMO-No. 72, Т.Р. 28, Geneva.

4. World Meteorological Organization, 1955: *The Standardization of the Measurement of Evaporation as a Climatic Factor* (G. W. Robertson). Technical Note No. 11, WMO-No. 42, T.P. 16, Geneva.
5. World Meteorological Organization, 1958: *Techniques for Surveying Surface-water Resources* (R. K. Linsley). Technical Note No. 26, WMO-No. 82, T.P. 32, Geneva.
6. World Meteorological Organization, 1973: *Applications of Hydrology to Water Resources Management*. Operational Hydrology Report No. 4, WMO-No. 356, Geneva.
7. Department of Northern Affairs and National Resources, 1961: *Proceedings of Hydrology Symposium No. 2 — Evaporation*.
8. Fiering, M. B., 1967: *Streamflow Synthesis*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
9. Chow, V. T. (ed.), 1964: *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
10. Lloyd, E. H., 1967: *Stochastic Reservoir Theory*, Volume 4, Advances in Hydroscience, Academic Press, New York.
11. Box, G. E. P. and Jenkins, G. M., 1970: *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco.
12. Maass, A., et al., 1962: *Design of Water-resources Systems*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
13. Graham, H. E. and Nunn, D. E., 1959: *Meteorological Considerations Pertinent to Standard Project Hurricane, Atlantic and Gulf Coasts of the United States*. National Hurricane Research Project, Report No. 33, U.S. Weather Bureau, Washington, D.C.
14. Saville, T., McClendon, E. W. and Cochran, A. L., 1962: Freeboard allowances for waves in inland reservoirs. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 88, WW2, pp. 93–124.



## ГЛАВА 53

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАВОДКОВ

#### 53.1       **Общие положения**

Большинство сооружений, построенных на реках или вблизи них, имеют определенную вероятность разрушения от паводков. Поскольку абсолютная защита от паводков обычно невозможна или экономически невыгодна, то рациональное проектирование таких сооружений должно допускать учет определенного риска их разрушения от паводков. Для целей расчета необходимо определить такой паводок, который соответствует максимальному допустимому риску. Такой паводок, называемый расчетным паводком, представляется в виде гидрографа паводка или максимального мгновенного расхода, принимаемого при проектировании гидротехнического сооружения или регулирования стока реки с учетом экономических и гидрологических факторов. Это такой паводок, при котором проектируемое гидротехническое сооружение может устойчиво эксплуатироваться без какой-либо существенной опасности разрушения как системы защиты, так и самого сооружения. Риск разрушения равен оценен вероятности появления паводков больших, чем расчетный паводок. Решающим фактором при определении расчетного паводка является характерная особенность или параметр паводка, которые могут считаться основной причиной возможного разрушения. Решение о том, какой из параметров паводка является определяющим для каждого конкретного проекта, принимается планирующими или проектными организациями на основании инженерного анализа конкретной ситуации.

Обычно основными параметрами расчетных паводков являются:

- a) максимальный расход за период паводка при расчетах переходов трубопроводов, мостовых переходов, водосливов и отверстий водовыпусков малых плотин и дамб;
- b) максимальный уровень воды за период паводка при расчетах высоты берегоукрепительных сооружений, подмостовых отверстий, зон затопления, при проектировании шоссейных и железных дорог в речных долинах;
- c) объем стока за паводок при проектировании противопаводочных водохранилищ и обычно для всех случаев стока, когда ослабление паводка за счет его аккумуляции в природном резервуаре может быть значительным, например при расчетах водопропускной способности водосливов и отметок водосбросов на плотинах;

- d) гидрограф стока за паводок в случаях, когда необходимо учитывать наложение нескольких паводков, например, при проектировании систем защиты от паводка ниже устьев крупных притоков или при эксплуатации водохранилищ во время паводков.

### 53.2 Расчетные паводки и их типы

В практике водохозяйственного строительства обычно рассматриваются следующие типы расчетных паводков:

- a) расчетный водосбросный паводок: этот термин часто используется при проектировании плотин для идентификации паводка, который должен пропускать водослив без серьезной угрозы разрушения плотины [1];
- b) строительный паводок: максимальный расход, по которому определяются соответствующие меры защиты от паводка на участках строительства в период возведения сооружений;
- c) максимальный возможный паводок (МВП): максимальный расход, который можно было бы ожидать на рассматриваемом участке при критическом сочетании всех сопутствующих факторов: условий местности, метеорологических, гидрологических и почвенных (раздел 27.3). Такой паводок по существу имеет бесконечно большой период повторяемости и может приниматься в качестве максимального расчетного паводка для обеспечения высокой степени безопасности сооружения;
- d) стандартный проектный паводок (СПП): паводок, формирующийся при наиболее неблагоприятном сочетании метеорологических и гидрологических условий, которые можно считать реальными для рассматриваемого региона, исключая самое критическое сочетание этих условий. Такой паводок имеет большой, но не бесконечный период повторяемости и может приниматься в качестве расчетного для сооружений высокого класса капитальности.

#### 53.2.1 Величина паводка и методы расчета

Основным правилом при выборе величины расчетного паводка является то, что риск разрушения сооружения от паводка выбирается тем меньшим (величина расчетного паводка больше), чем больший размер возможного материального ущерба от паводка. Для сооружений, последствия от разрушений которых невелики (трубопроводы, второстепенные дороги), максимальный паводок может быть рассчитан с помощью эмпирических методов, поскольку точный период его повторяемости играет относительно небольшую роль. Для сооружений или проектов, разрушение которых может привести к большому материальному ущербу, но без угрозы жизни населению, максимальный паводок должен рассчитываться, если это возможно, методами, позволяющими оценивать период повторяемости, необходимый для определения величины расчетного паводка на основе методов оптимизации. В случаях, когда разрушение сооружения связано с угрозой для

жизни людей, необходимо предусмотреть максимальную защиту от разрушения, поэтому в качестве расчетного принимается максимально возможный паводок или стандартный проектный паводок.

### 53.2.2 *Период, на который проектируется сооружение*

Во многих случаях, когда расчетный паводок выбирается на основе оптимизации связи между ожидаемым ущербом от паводка и затратами на мероприятие по защите от него, оптимальная степень допустимого риска зависит в определенной мере от продолжительности периода эксплуатации проектируемого сооружения. Этот период называется долговечностью проектируемого сооружения или уровнем планирования и определяется на стадии планирования, исходя из следующих четырех временных интервалов [2]:

- a) физический срок службы, который заканчивается, когда оборудование неспособно обеспечивать заданные функции из-за физического износа;
- b) экономический срок службы, который заканчивается, когда выгоды от продолжающейся эксплуатации сооружения становятся меньше затрат на поддержание его работоспособности;
- c) расчетный период — интервал времени, в течение которого ожидается, что оборудование будет выполнять свои функции в условиях, которые можно предвидеть во время проведения расчетов (работа сооружения в отдаленном будущем, условия которого имеют высокую степень неопределенности, исключается из рассмотрения);
- d) конструктивный срок службы, который достигается, когда оборудование не может обеспечивать повышенных требований в будущем (функциональное старение).

Оптимальная степень расчетного риска и, следовательно, расчетная повторяемость паводка для каждого из этих периодов могут быть различны. Кроме того, при окончательном выборе расчетного паводка не могут не учитываться политические, социальные, природоохранные и другие количественно неопределяемые критерии.

### 53.2.3 *Расчетные паводки для больших водохранилищ*

Выбору расчетного паводка при проектировании водохранилищ для больших водохранилищ должно быть уделено особое внимание, поскольку водохранилище может существенно изменять паводочный режим как в границах зоны затопления, так и на нижерасположенных участках реки.

Основной эффект водохранилища в отношении паводка — его ослабление. Оценка регулирующего влияния водохранилищ требует сведений о первоначальной форме гидрографа паводочного стока. При отсутствии таких сведений допускается гипотетическая форма (часто треугольная) гидрографа, на основании которого определяется объем стока и максимальный расход. При оценке возможности

снижения пропускной способности водослива и высоты надводной части плотины за счет эффекта снижения паводка водохранилищем крайне необходимо применять взвешенные подходы и рассматривать только те эффекты, которые могут быть гарантированы в течение всего периода эксплуатации водохранилища. Например, оценку влияния водослива без затвора следует выполнять, предполагая, что все водопропускные отверстия с затворами закрыты, а водохранилище заполнено до отметки гребня беззатворных водосливов к моменту начала паводка.

Кроме оценки ослабляющего влияния на паводок, следует провести тщательный анализ паводочного режима в нижнем бьефе с точки зрения изменений во времени прохождения максимальных расходов, форм гидрографов паводков, а также влияния на эрозионные процессы в русле вследствие осветления сбрасываемой через водосливы воды.

Тип конструкции плотины также должен быть рассмотрен, поскольку он имеет огромное значение при оценке устойчивости плотины в случае перелива воды через ее гребень. Наименее устойчивыми в этом плане являются насыпные земляные плотины, которые обычно разрушаются при переливе воды через гребень.

#### 53.2.4 *Максимальный возможный паводок (МВП)*

Максимально возможный паводок рассчитывается по величине максимально возможных осадков (раздел 29.4) или исходя из самого критического сочетания максимальной интенсивности снеготаяния и максимально возможных дождевых осадков, которые могут выпасть в период наиболее интенсивного таяния снега (раздел 31.7). Поскольку дождевые осадки обычно дают основной вклад в МВП, специально должен рассматриваться вопрос о трансформации осадков в сток. Такая трансформация выполняется с помощью детерминированных моделей осадки—сток (разделы 33.3 и 39.3), но их применение для этой цели требует учета определенных особенностей, обусловливающих формирование экстремального количества осадков, которые используются как вход в модель. Наиболее важными особенностями являются следующие:

- a) влияние на сток начальных условий увлажнения почвы и изменения скорости инфильтрации во время выпадения дождевых осадков намного ниже в сравнении с эффектом влияния этих факторов в нормальных условиях. Следовательно, методы, применяемые в большинстве моделей для оценки инфильтрации, могут быть значительно упрощены. Обычной практикой является использование показателя наименьшей влагоемкости или максимального коэффициента стока (характерного для данного типа почв и растительного покрова) в течение всего периода выпадения осадков, формирующих паводок;
- b) если для трансформации максимальных осадков в сток используется метод единичного гидрографа, следует помнить, что надежность принятых допущений и линейности ограничивается теми условиями, для которых единичный

гидрограф был получен. Анализ паводков, выполненный для ряда речных бассейнов [3], показал, что максимальные ординаты единичных гидрографов, полученные для больших паводков (более 125 мм слоя стока), часто оказывались на 25–50 % выше, чем максимальные ординаты, полученные для умеренных паводков (25–50 мм стока). Поэтому важно иметь в виду, что при выводе единичного гидрографа для расчета МВП следует руководствоваться необходимостью использования неоднократно проверенных методов оценки;

- c) для водосборов с площадями более 500 км<sup>2</sup> или даже меньших речных бассейнов, если их отдельные части имеют существенно различные характеристики стока, обычно необходимо определять отдельные единичные гидрографы и МВП для каждого участка водосбора, а затем получать МВП для всего бассейна, последовательно рассчитывая трансформацию компонентов паводков вниз до створа проектирования. Необходимо помнить, что аналогичное положение складывается при применении метода изогиет для определения расчетного ливня по водосбору, который дает максимальный паводок, если единичный гидрограф получен для всего водосбора, но неприменим для расчета максимального паводка, если водосбор подразделен на несколько участков. Таким образом, для каждого участка водосбора оптимальная методология оценки расчетного ливня (т. е. методология, позволяющая учесть самые неблагоприятные сочетания факторов формирования МВП) должна выбираться индивидуально с учетом орографии водосбора, о чем говорилось в разделе 29.4.

Несмотря на то что для МВП период повторяемости может специально не определяться, полученные параметры МВП должны сравниваться с соответствующими параметрами кривых распределения вероятностей, полученных по данным фактических наблюдений, чтобы убедиться, что они имеют существенно более редкую повторяемость, выходящую за пределы наблюденных паводков.

### 53.2.5 *Стандартный проектный паводок (СПП)*

Стандартный проектный паводок составляет обычно около 50 % МВП [1]. При его определении руководствуются теми же правилами, что и при определении МВП. Стандартный проектный паводок обычно определяется посредством трансформации наибольшего наблюденного ливня в районе, прилегающем к объекту проектирования, а не по максимально возможному ливню, как это рекомендуется в случае определения МВП. Несмотря на это, стандартный проектный паводок должен представлять крайне редкое событие и не может быть превышен более чем на несколько процентов по сравнению с выдающимися паводками, наблюденными в пределах всего региона [1].

### 53.3 *Подготовка данных*

Основными данными для определения расчетных паводков являются данные наблюдений и измерений, собранные региональными или национальными

гидрологическими и метеорологическими службами. Эти данные существуют в виде записей уровней и измерений расходов, которые создают основу для расчета кривых расходов.

Для правильной оценки режима паводочного стока важно получить достаточную информацию с историческими данными о паводках. Особую ценность в составе такой информации представляют данные об уровне. При сборе информации о максимальных уровнях могут быть использованы следы материалов, отложенных паводками, отметки уровней высоких вод (УВВ) на мостах, строениях, берегах рек, имеющиеся материалы, опубликованные статьи и мемуары.

Для того чтобы перейти от полученных таким образом сведений об уровнях к расходам воды, следует провести гидравлические расчеты, основанные на восстановленных поперечных сечениях реки, продольных профилях, уклонах водной поверхности и коэффициентах шероховатости русла. Все известные преобразования речного русла должны быть приняты во внимание (например: дноуглубление, крепление берегов, спрямление русла). Вследствие ограниченной точности восстановленных характеристик речного русла, удовлетворительные результаты при проведении гидравлических расчетов такого рода обычно получаются при применении формулы Шези—Маннинга.

### 53.4 Методы определения расчетного паводка

Выбор метода для определения расчетного паводка зависит от вида, количества и качества имеющихся гидрологических данных. В общем случае наилучшим является тот метод, который позволяет извлечь наибольшее количество необходимой информации из имеющихся данных. Следует подчеркнуть, что определяющим для каждого конкретного проекта, принимается не какой-нибудь слишком рафинированный метод, а метод, наиболее подходящий для данного, конкретного случая. Например, в то время как совершенно верным является тот факт, что применение метода трехпараметрического распределения вероятностей дает наилучшие результаты анализа, нежели метод двухпараметрического распределения, было бы неверным утверждать, что трехпараметрическая модель всегда будет более предпочтительной по сравнению с двухпараметрической. Выбор того или иного аналитического распределения зависит от объема выборки. Относительная эффективность трехпараметрической модели в основном уменьшается с уменьшением длины выборки, так как для малых выборок эмпирическая погрешность оценки третьего параметра распределения может быть гораздо больше того эффекта, который связан с получением дополнительной информации. Эта погрешность может привести к худшей сходимости эмпирической и аналитической кривых, чем в случае, если бы третий параметр не учитывался.

Для того чтобы извлечь максимум информации из недостаточных или неточных данных, целесообразно применять несколько различных методов, сравнивать результаты, а затем выбирать расчетные параметры, основываясь на инженерном подходе. Сравнительный анализ может быть полезным при принятии окончательного решения, поскольку он позволит выявить влияние возможных погрешностей на величину расчетного параметра.

#### 53.4.1 *Эмпирические методы*

С помощью эмпирических формул можно получить простые зависимости между переменными паводка (обычно максимальным расходом) и факторами их формирования, представленными различными геоморфологическими и метеорологическими переменными. Общий вид формулы, выражающей максимальный расход  $Q$  в виде степенной функции площади водосбора  $A$ , имеет вид

$$Q = CA^n, \quad (53.1)$$

где коэффициент  $C$  и показатель степени  $n$  меняются в широких пределах, их значения для частных случаев определяются на основе эмпирических данных [4].

Применение эмпирических формул обычно ограничивается тем районом, для которого они были разработаны, поэтому их следует использовать с большой осторожностью и только тогда, когда нельзя применить более точный метод. Другой недостаток эмпирических формул — трудность оценки периода повторяемости, полученного на их основе.

Максимальные паводочные расходы, наблюденные по большому числу станций, могут быть нанесены на клетчатку как функция площади водосбора, и полученное поле точек огибается слаженной кривой. Такие кривые несут полезную информацию, особенно в случае, когда по каждой отдельной станции имеются ограниченные выборки. Предпринимались попытки разработать методику построения различных огибающих кривых применительно к разным климатическим и геоморфологическим факторам [5]. Однако общим недостатком метода огибающих кривых является неопределенность периода повторяемости полученных максимальных расходов.

#### 53.4.2 *Детерминированные модели*

Детерминированные модели используются для генерирования расчетных паводков на основе имитации физических процессов, управляющих формированием паводков. Модели, используемые для этой цели, по своей сущности — такие же, как и те, которые используются для генерирования основных процессов стока (главы 33 и 34). Однако из-за того, что в этой главе упор больше делается на кратковременные события, а не на продолжительные фазы речного стока, выбор,

калибровка и применение моделей для расчета паводков могут отличаться от аналогичных действий применительно к моделированию основного режима стока. В частности, модели должны обеспечивать точное воспроизведение максимальных расходов объемов и форм гидрографа отдельных паводков, соответствующих реальным условиям выпадения осадков и снеготаяния.

В то же время способность модели предсказать точное положение каждого отдельного паводка имеет второстепенное значение. В зависимости от того, как моделируется расчетный паводок — на основании данных об осадках и/или условиях снеготаяния, или на основании известных гидрографов паводка, полученных для вышерасположенного створа, — детерминированные модели разделяются на две большие группы:

- a) модели осадки—сток, которые описаны в главе 33;
- b) модели трансформации речного стока, которые описаны в главе 34.

#### 53.4.3 *Вероятностные методы*

Одним из главных вопросов при генерировании расчетного паводка является оценка рисков, связанных с появлением паводков более высоких, чем расчетный. Оценка таких рисков является важной, ввиду их социальной, экологической и экономической значимости, например: при определении размеров страхования от паводков, при оценке зон затопления или контроле качества воды. Поскольку паводки являются вероятностным явлением, их величина и время появления в будущем не могут быть предсказаны. Существует только возможность оценить их на вероятностной основе, т. е. получить оценку вероятности, что паводок данной величины будет превышен в течение определенного периода времени. Переменная, вероятность превышения которой —  $p$ , имеет период повторяемости  $T = l/p$ .

Руководящие материалы по частотному анализу в целом представлены в главе 27 и, в частности, по анализу повторяемости паводков в главе 36.

Вероятность превышения данной величины, полученная по модели распределения вероятностей, приписывается каждому будущему событию. Таким образом, если рассматривается серия максимальных годовых паводков, то вероятность превышения  $p_n$  характеризует риск за счет того, что данное значение будет превыщено в каком-либо одном году. Часто, однако, возникает необходимость определения вероятности  $p_n$  того, что данное явление (например заданный максимальный расход) произойдет, по крайней мере, однажды за  $n$  лет, например в течение срока эксплуатации сооружения. Если предположить, что ежегодные паводки являются независимыми событиями, то такая вероятность рассчитывается по формуле

$$p_n = 1 - (1 - p)^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n, \quad (53.2)$$

где  $T$  — период повторяемости. Таким образом риск, что событие произойдет, по крайней мере один раз за период повторяемости, определяется из уравнения (53.2) при  $n = T$ . При достаточно большом значении  $T$  величина риска приближается к асимптотической величине  $1 - e^{-1} \approx 0,63$ .

Из уравнения (53.2) можно получить выражение для  $T$  в виде функции  $p$  и  $p_n$ , т. е. рассчитать период повторяемости таким образом, чтобы риск появления события в течение  $n$  лет имел бы заданную вероятность  $p_n$ . Этот период повторяемости называется расчетным периодом повторяемости  $T_d$  и определяется по формуле

$$T_d = 1/[1 - (1 - p_n) 1/n]. \quad (53.3)$$

Подходящей аппроксимацией этой формулы будет

$$T_d = n \left( \frac{1}{p_n} - \frac{1}{2} \right). \quad (53.4)$$

Некоторые значения переменных  $T_d$ ,  $n$  и  $p_n$  показаны ниже в таблице. Для того чтобы пояснить ее использование, предположим, что срок службы проектируемой плотины составляет 50 лет, и что проектировщики задают только 10 % риска того, что плотина будет разрушена в течение этого периода. Таким образом  $n$  равняется 50,  $p_n$  равняется 0,10, и плотина должна быть спроектирована так, чтобы выдержать паводок, период повторяемости которого  $T_d = 475$  годам, т. е. вероятность превышения  $p = 1/T_d \approx 0,2\%$ .

**Расчетный период повторяемости  $T_d$  для риска  $p_n$  появления события в течение  $n$  лет**

$p_n$	$n$ лет			
	2	10	50	100
0,01	199,0	995,0	4 975,0	9 950,0
0,10	19,5	95,4	475,0	950,0
0,50	3,4	14,9	72,6	145,0
0,75	2,0	7,7	36,6	72,6

**Список литературы**

1. Linsley, R. K. and Franzini, J. B., 1972: *Water Resources Engineering*. McGraw-Hill, New York.
2. James, L. D. and Lee, R. R., 1971: *Economics of Water Resources Planning*. McGraw-Hill, New York.
3. Morris, W. V., 1961: Conversion of storm rainfall to runoff. *Proceedings of Symposium No. 1 — Spillway Design Floods*, 4–5 November 1959, Ottawa, Department of Northern Affairs and National Resources, Water Resources Branch, pp. 172–226.
4. Eagleson, P. S., 1970: *Dynamic Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
5. Francou, J. and Rodier, J., 1967: Essai de classification des crues maximales observées dans le monde. *Cahier d'hydrologie de l' ORSTOM*, Vol. IV, No. 3.

## ГЛАВА 54

### УМЕНЬШЕНИЕ ОПАСНОСТИ ПАВОДКОВ

#### 54.1       **Общие положения**

Работы по регулированию паводков могут включать создание противопаводковых валов и дамб вдоль реки с целью сосредоточения потока в определенном русле или направления в специальные каналы для пропуска паводковых вод; к этим работам относится также создание водохранилищ, предназначенных для задержания части паводочного стока и уменьшения пика паводков на участке реки ниже водохранилища. При проектировании валов и дамб следует обращать особое внимание на связанные с этим меры по устройству внутреннего дренажа. Для этого могут потребоваться крупные насосные установки и площади под пруды.

#### 54.2       **Водохранилища, регулирующие паводочный сток**

Размер емкости, который должен быть обеспечен в водохранилище, будет зависеть от требований по снижению паводка и характеристик паводочного стока. Если паводки происходят только в течение определенных периодов года, то еще до наступления паводка можно снизить уровень воды в водохранилище, который может быть восстановлен после того, как опасность минует. В этом случае снижение паводка достигается путем регулирования эксплуатационного режима водохранилища, а не путем создания дополнительных емкостей. Однако в районах, где мгновенные паводки могут случиться практически в любое время года, в резерве постоянно должна иметься регулирующая емкость для временного использования для паводковых вод.

Регулирующая емкость, находящаяся в резервуаре для регулирования паводков, может быть создана либо в водохранилищах речного, либо приречного типа, в то время как емкости многоцелевого назначения обычно создаются только в речных водохранилищах. Речные водохранилища образуются выше плотины, перегораживающей реку, а приречные водохранилища располагаются рядом с рекой и соединяются с ней каналами, водосбросами и т. д.

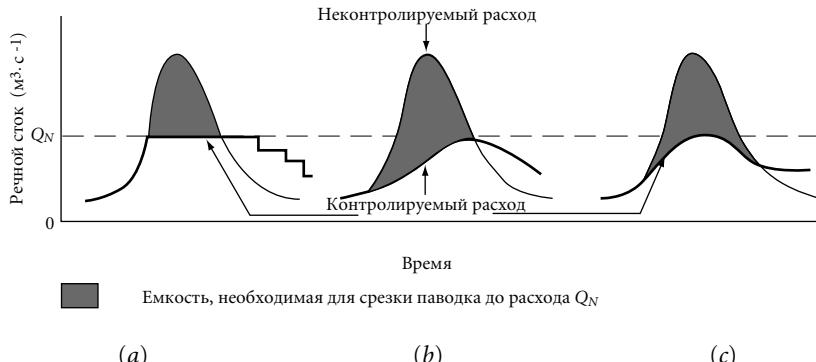
#### 54.2.1       **Задачи проектирования**

Срезка паводка достигается задержанием и накоплением части паводковых вод в водохранилище. Требуемая для срезки паводка емкость определяется

обычно как та часть объема водохранилища, которая может обеспечить определенное снижение пика паводка заданной величины или заданной повторяемости.

Различаются следующие три основных типа противопаводочной емкости:

- регулируемая емкость или речного, или приречного водохранилища;
- нерегулируемая емкость речного водохранилища;
- нерегулируемая емкость приречного водохранилища.



Влияние водохранилищ на паводки: (a) — регулируемая емкость, (b) — нерегулируемая емкость речного типа, (c) — нерегулируемая емкость приречного типа

Объем емкости, необходимой для достижения заданного эффекта, будет зависеть от типа противопаводочной емкости. Влияние на срезку паводка каждого типа противопаводочных емкостей показано на рисунке выше и описано в последующих разделах. В реальной практике эффект регулирования паводочного стока водохранилищем достигается обычно сочетанием регулируемой и нерегулируемой емкостей.

#### 54.2.1.1 Регулируемая емкость для задержания паводка

Полный контроль за задержанием паводочной волны противопаводочной емкостью водохранилища обеспечивает самую высокую эффективность снижения паводка, т. к. начать накопление воды в этом случае можно только после того, как наибольший допустимый расход (называемый также безопасным расходом) будет достигнут в створе плотины.

Контроль за накоплением воды достигается регулированием водопропускных отверстий, имеющих затворы на водохранилищах речного типа. Водохранилища речного типа осуществляют полный контроль за паводком только в тех случаях, если

водослив имеет пропускную способность, достаточную для сброса безопасных расходов при минимальной противопаводочной емкости, и сбросы воды из противопаводочной емкости могут быть полностью регулируемы.

На водохранилищах приречного типа полный контроль за паводком достигается в тех случаях, если пропускная способность подводящих устройств, достаточная для предотвращения возрастания расходов на нижерасположенных участках, — выше безопасного расхода и если попуски накопленной воды могут регулироваться.

Расчетный паводок для определения размеров противопаводочной емкости водохранилища должен быть таким же, как он принят для расчета водосливов, хотя требования к безопасности самой плотины обычно отличаются от требований обычной защиты от паводков на нижерасположенных участках.

#### 54.2.1.2 *Нерегулируемая емкость для задержания паводка водохранилищ речного типа*

Емкость водохранилища выше гребня фиксированного водослива обычно считается нерегулируемой при проектировании, хотя она может частично регулироваться попусками воды через водопропускные отверстия с затворами или через турбины. Однако при проектировании нерегулируемой противопаводочной емкости попуски либо принимаются постоянными в период пропуска паводка, либо считается, что водосбросы закрыты. Первое условие обычно принимается при оценке влияния нормального противопаводочного режима водохранилища на условия в нижнем бьефе, в то время как второе — для оценки безопасности самой плотины.

Нерегулируемая емкость для задержания паводка играет важную роль в предотвращении прорыва плотины. Ее проектирование тесно связано с проектированием водопропускных отверстий плотины и должно быть основано на том же расчетном паводке, который принимается при расчете водосбросов. Из соображений безопасности при проектировании водосливов принимается, что водохранилище полностью заполнено до гребня водослива к началу расчетного паводка.

Сравнение приведенных на рисунке условий (a) и (b) показывает, что нерегулируемая емкость менее эффективна при срезке паводка, чем регулируемая. Это объясняется тем, что нерегулируемая емкость начинает наполняться до того, как это требуется.

#### 54.2.1.3 *Нерегулируемая емкость для задержания паводка водохранилищ приречного типа*

Этот тип противопаводочной емкости создается на водохранилищах приречного типа, иногда называемых «польдерными» из-за того, что их конструкция

напоминает реальные польдеры. Такие водохранилища сооружаются ограждением части заливаемой поймы плотиной, гребень которой со стороны реки имеет пониженный участок, т. е. порог. Когда уровень воды в реке поднимается выше порога, то польдер начинает наполняться в результате переливания воды через порог. Тот факт, что водохранилище имеет обводные каналы, делает нерегулируемую противопаводочную емкость приречного типа более эффективной по сравнению с речной, поскольку наполнение ненужными водами начинается позже (части (b) и (c) на рисунке).

#### 54.2.2 *Учет режима эксплуатации водохранилищ для проектных целей*

Емкость для задержания паводка чаще всего предусматривается в речных водохранилищах многоцелевого назначения, имеющих водосливы с затворами, которые обеспечивают высокую степень регулирования. В таких водохранилищах всегда предусматривается некоторый нерегулируемый объем для задержания паводка и во многих случаях также часть регулируемого объема, сохраняемого для задержания паводка. Кроме того, емкости, предназначенные для других целей, время от времени могут быть использованы в целях регулирования паводка. Такое разнообразие целей, для которых создается водохранилище, допускает большую гибкость и ставит срезку паводка в сильную зависимость от режима эксплуатации водохранилища. Следовательно, в таких случаях необходимо выполнить детальный анализ режимов эксплуатации водохранилища на ранних стадиях проектирования, т. к. его результаты могут повлиять на выбор расчетных переменных.

#### 54.2.3 *Дополнительные соображения, касающиеся противопаводочных водохранилищ*

##### 54.2.3.1 *Временной интервал между последовательными паводками*

Использование емкости водохранилищ для срезки паводка требует рассмотрения вопроса о возможности появления двух или более паводков, следующих друг за другом и, следовательно, возможности того, что объем задержания, заполненный одним паводком, может не успеть опорожниться до подхода следующего паводка. Эта проблема, по существу, требует рассмотрения распределения вероятностей временных интервалов между паводками определенной величины и может быть решена с помощью частотного анализа (раздел 27.2) данных фактических наблюдений за речным стоком, характеристик синоптических и погодных условий или моделюемых рядов по стоку, полученных с помощью детерминированных моделей по данным об осадках (раздел 33.3). Однако нужно проявлять определенную осторожность при экстраполяции кривых распределения вероятностей интервалов между паводками, чтобы не выходить за физические пределы.

#### 54.2.3.2 *Влияние отложения наносов*

Отложение наносов в водохранилище снижает его регулирующую способность и, тем самым, его способность выполнять свою функцию. Большинство водохранилищ располагают определенной частью емкости, предназначеннной для отложения наносов с тем, чтобы предотвратить преждевременное уменьшение полезного объема. Однако может случиться, что этот объем окажется недостаточным. В этом случае емкость для задержания паводка может быть значительно затронута, т. к. она занимает верхнюю часть водохранилища, где наносы отлагаются в первую очередь. Таким образом, с течением времени происходит уменьшение противопаводочной емкости водохранилища. Это должно учитываться при долгосрочном планировании мероприятий по защите от паводков, чтобы альтернативные меры могли быть предприняты вовремя.

#### 54.2.3.3 *Влияние развития хозяйственной деятельности*

Проектирование противопаводочного сооружения основывается на результатах анализа наводнений, которые имели место в прошлом, в то время как сооружение предназначено для регулирования будущих паводков. Рост населения и уровня жизни приводит к интенсивному использованию земель. Угодья, занятые лесом, могут быть преобразованы в сельскохозяйственные поля, дренажные системы которых могут быть улучшены. Переход от ручной обработки земли к механизации сельскохозяйственных работ, а также расширение и интенсивное освоение урбанизированных территорий часто способствуют увеличению объемов и расходов поверхностного стока и переноса наносов. Применение методов разумного рационального использования почвы способствует сокращению этих явлений. Оценить гидрологические последствия развития землепользования весьма трудно, однако гидролог должен знать их роль в увеличении риска возникновения паводка.

### 54.3 *Другие меры, связанные со строительством сооружений*

#### 54.3.1 *Забор воды*

Проектирование забора паводочных вод из одной реки для переброски ее в другую связано со следующими гидрологическими расчетами:

- a) определение гидрографов паводочного стока для обеих рек;
- b) выделение на гидрографе части стока, которая будет отводиться;
- c) расчет трансформации перебрасываемого стока в канале переброски;
- d) наложение перебрасываемого стока на паводок, формирующийся в реке-приемнике;
- e) оценка повторяемости паводков в новых условиях на нижних участках обеих рек.

Особое внимание должно быть уделено оценке паводков в реке-приемнике, формирующихся в результате наложения двух сдвинутых по фазе исходных

паводков, так же, как и влиянию подпора, который может приводить к возрастанию опасности паводков на участке, расположенному выше места соединения отводящего канала с рекой-приемником.

#### 54.3.2 *Преобразование русел*

Преобразование русла обычно нацелено на увеличение его пропускной способности за счет углубления и расширения, спрямления меандров и сокращения длины, а также расчистки и возможного спрямления в целях снижения сопротивления движению воды. Результатом этих мероприятий является увеличение скорости потока и снижение уровня воды в пределах участка, подверженного эффекту снижения паводка в результате преобразования русла, что приводит, в свою очередь, к увеличению типов паводков на нижерасположенном участке. Влияние преобразования русла лучше всего оценивать гидравлическими методами трансформации стока (глава 34), обращая внимание на взаимодействия паводков, формирующихся в основном русле и на нижерасположенных притоках. Побочное влияние преобразования русла проявляется в увеличении отложений наносов ниже по течению.

Противоположных эффектов можно достичь за счет снижения пропускной способности русла различными регулирующими сооружениями. Затруднения течения, они способствуют увеличению паводков на верхних участках и их снижению на нижерасположенных участках. Механизм их функционирования подобен водохранилищам с нерегулируемой противопаводочной емкостью (раздел 54.2.1.2).

#### 54.3.3 *Дамбы и защитные стенки*

Противопаводочные насыпные дамбы, расположенные вдоль потока, либо окружающие прибрежные участки, являются основными средствами защиты от паводков, особенно на равнинных участках и на участках вдоль крупных рек. Они могут применяться в сочетании с другими методами (обводными каналами, водохранилищами местного стока, аварийными водохранилищами и с методами районирования). Противопаводочные насыпные дамбы сооружаются в основном из песка и должны быть устойчивыми к паводочным уровням, воздействию волн и просачиванию, особенно к «кипящим источникам» (восходящим потокам воды в песчаной формации) и к внутренней эрозии.

При сооружении насыпных дамб следует учитывать следующее:

- a) расчетные паводочные уровни, установленные в соответствии с экономической значимостью защищаемой территории;
- b) расчетная высота надводной стенки, препятствующей переливу и воздействию волн;
- c) продолжительность стояния паводочных уровней для расчета просачивания и гидравлических градиентов в земляной дамбе и нижерасположенных грунтах;
- d) вероятность возникновения ледяных заторов и последующих подпорных явлений.

Расчетные уровни воды должны быть оценены на основе данных наблюдений за участками реки, свободными ото льда, при условии, что режим потока ничем не нарушен. На реках, где в результате деятельности человека режим течения нарушен (водохранилища выше по течению, дамбы или плотины), расчетный уровень воды следует оценивать на базе гидравлических условий [1].

Вероятность превышения расчетного уровня воды для насыпных дамб обычно находится в пределах от 2,1 до 0,1 % (один раз в 50, 100 или 1 000 лет) в зависимости от ценности защищаемой территории. На реках, подверженных частому образованию заторов, уровни воды должны быть рассчитаны с учетом этого явления.

Высота надводной стенки дамбы на проектном уровне паводка должна гарантировать невозможность перелива воды через гребень во время максимальных паводков, фильтрации, способной вызвать значительное течение внутри тела дамбы, и перелива волн через гребень дамбы. В зависимости от условий волнения и наклона внутренней стенки дамбы высота надводной части дамбы обычно должна быть в пределах одного—двух метров. Надводная часть дамбы может быть усиlena за счет сооружения противопаводочных стенок по гребню дамбы.

Устойчивость насыпных дамб зависит от продолжительности паводков. Таким образом, статистический анализ продолжительности стояния определенных уровней воды может помочь при проектировании и строительстве дамб, устойчивых к фильтрации.

Расположение насыпных дамб, определяющее ширину незащищенной части поймы, оказывает влияние на уровни воды выше по течению реки. Сильное сжатие потока дамбами может вызвать существенный подъем паводочных уровней. Следовательно, при проектировании противопаводочных дамб должны приниматься во внимание новые уровни воды выше по течению реки. Размеры незарегулированной части поймы также требуют должного внимания в отношении изменения гидравлического сопротивления под влиянием растительного покрова.

Угроза прорыва насыпных дамб не может быть исключена полностью. Размер территории, которая будет затоплена при прорыве дамбы, может быть оценен на основе предшествующего опыта. Аварийные предупреждения для населения могут составляться, если такой опыт имел место. Планирование защитных мероприятий — весьма важно для таких территорий, где эвакуация населения при наводнении может стать необходимостью.

#### 54.4 Мероприятия, не связанные со строительством сооружений

##### 54.4.1 Регулирование пойм

Поймы рек благоприятны для ведения сельского хозяйства, развития муниципального, промышленного и транспортного строительства из-за плодородных

почв, близости воды и наличия строительных материалов, таких, как песок и гравий, а также из-за того, что их равнинный характер облегчает строительство и доступ к таким территориям. По этим причинам и вследствие высокой стоимости и ограниченной эффективности противопаводочных сооружений возникает настоящая необходимость регулировать использование пойменных земель выделением соответствующих зон и страхованием возможных ущербов от паводков.

Задача гидролога — оконтурить площади затопления для паводков различной повторяемости. Эта задача может быть решена посредством расчета трансформации паводочных волн в пойме различной повторяемости, определения уровня воды и нанесением на топографической карте зон затопления.

#### **54.4.2      *Предупреждения о паводках***

Для улучшения результатов по смягчению отрицательных последствий от паводков необходимо предпринять активные действия против разрушений, а не просто положиться на существующие структурные средства, меры по районированию паводков и др. Активный подход состоит в разработке различных специальных мер, которые необходимы в условиях данного конкретного паводка, например: эвакуация населения из зон затопления, перевозка ценного оборудования, а также сооружение временных запруд из мешков с песком, с одновременной откачкой воды. Для этих целей необходимо разработать эффективную систему предупреждений о паводках (раздел 44.3.1), через которую можно было бы заблаговременно передать сообщение об ожидаемом размере и продолжительности паводка. Необходимо подчеркнуть, что важным моментом в этой связи является необходимость постоянного функционирования этой системы, несмотря на то что использоваться она может лишь эпизодически. Система, которая приводится в действие лишь однажды за много лет, может оказаться несостоятельной в момент острой необходимости. Напротив, в результате постоянной работы системы, аппаратное и программное ее обеспечение, а также организация всей системы будут поддерживаться в хорошем рабочем состоянии, что будет способствовать значительному совершенствованию всей системы предупреждений. Для того чтобы постоянная работа системы была экономически эффективной, она может использоваться в сочетании с другой деятельностью, такой, как обычные ежедневные прогнозы погоды, регулярные гидрометрические измерения и регулирование движения.

#### **54.5            *Проектирование водоотводящих систем в городах и на небольших водосборах в сельской местности***

##### **54.5.1          *Особенности дренажных систем***

Проектирование дренажных систем в городах и на малых сельскохозяйственных водосборах имеет некоторые особенности в связи со следующими обстоятельствами:

- a) площадь дренирования на урбанизированных водосборах обычно очень мала;
- b) урбанизированные водосборы обычно имеют большую долю непроницаемых площадей, увеличивающих максимальный сток;
- c) процесс формирования паводка на урбанизированных водосборах протекает обычно быстрее, чем на больших сельскохозяйственных водосборах;
- d) вода обычно дренируется не реками, а скорее закрытыми трубопроводами и каналами;
- e) измерения расходов воды на урбанизированных водосборах обычно не производятся.

Вследствие повсеместного недостатка данных о речном стоке для малых сельских водосборов и урбанизированных территорий проектирование ливневых дренажных систем должно, как правило, начинаться с анализа повторяемости дождевых осадков различной интенсивности (главы 28 и 29).

В основном с экономической точки зрения неэффективно проектировать городские или сельскохозяйственные дренажные системы (канализационные коллекторы, дрены у дорог и на аэродромах, дренажные трубы, насосные станции для низинных районов и др.), предназначенные для наиболее интенсивных осадков, — более точно, предназначенные для наиболее критических расходов воды, — которые могут случиться за период эксплуатации системы.

Таким образом, как правило, эти системы следует проектировать с учетом обеспечения защиты от осадков заданной интенсивности и продолжительности, а не максимально возможных осадков.

Расчетный расход для дренажной системы должен быть определен с учетом таких факторов, как ожидаемый ущерб из-за чрезмерной нагрузки на работы при пропуске больших, но редких расходов воды, а также дополнительных затрат на проектирование и строительство системы, способной справляться с такими редкими расходами воды.

Вопрос проектирования сельскохозяйственных дренажных систем рассматривается в главе 55.

#### 54.5.2 *Расчетные расходы на выходе дренажных систем*

Величины расходов воды на выходе дренажной системы, обусловленных осадками данной интенсивности, часто оцениваются так называемым рациональным методом, который описан в деталях в справочниках и наставлениях [2, 3]. Этот простой метод, используемый в практике планирования и проектирования дренажных систем более столетия, основан на данных о максимальной интенсивности осадков за время концентрации стока и коэффициентах стока, зависящих от рельефа водосбора. Однако этот метод применим только для малых площадей с коротким периодом концентрации стока. Он используется только для расчета значения максимального расхода, а не объема стока и формы гидрографа.

Рациональный метод не подходит для описания режима урбанизированного водосбора, на котором располагаются несколько ответвлений канализационных каналов.

В этом случае при наличии данных для имеющихся сетей канализации может быть сформулирован единичный гидрограф (раздел 33.3.1). При отсутствии данных или при проектировании видоизмененной сети для системы, использующей один из многих, имеющихся в наличии методов [4, 5, 6], может быть определена кривая связи времени добегания с площади или отдельных участков.

Проектирование и функционирование канализационной сети в большом городе может гарантировать использование моделей распределительных систем. В последнее время создание таких моделей получило широкое развитие, и в настоящее время имеется много различных их типов [7, 9].

Современные тенденции проектирования городских и малых сельскохозяйственных дренажных систем состоят в процессе от анализа метеорологических данных до синтеза расчетных ливней, которые затем используются в качестве входных параметров детерминированных моделей для получения гидрографов расчетных паводков с отдельными входами в речную систему или для различных участков водосбора. Эти гидрографы затем обрабатываются для всей дренажной системы с помощью методов расчета трансформации потока, давая в результате окончательный гидрограф расчетного паводка для конкретных участков системы. Описание и оценка ряда последних гидрологических моделей для городских водосборов представлены Марсалеком в *Urban Hydrological Modelling and Catchment Research in Canada* [8] (Научные исследования в области городского гидрологического моделирования и водосборов в Канаде) и Максимовичем и Радойковичем в *Urban Drainage Modelling* [9] (Моделирование городского дренажа).

#### 54.6 Влияние на гидрологический цикл

Дренажные системы на урбанизированных территориях оказывают заметное влияние на гидрологический цикл: изменяются гидрографическая сеть и рельеф так же, как и гидроклиматические элементы (местный климат, осадки, испарение и т. д.), поверхностная и подповерхностная аккумуляция, поверхности и подземный сток, качество воды, эрозия и перенос наносов. Также изменяются водно-балансовые соотношения в районах, затронутых урбанизацией. Методология количественной оценки этих изменений изложена в работах, изданных ЮНЕСКО: *Manual on Drainage in Urbanized Areas* [2] (Настоящие по дренажу на урбанизированных территориях) и *Manual on Urbanization Effects on Hydrology and Water Quality* [3] (Настоящие по влиянию урбанизации на гидрологию и качество воды).

**Список литературы**

1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1984: *Regulated River Basins — A Review of Hydrological Aspects for Operational Management* (T. Kitson, ed.). IHP-II project A.22, Technical Documents in Hydrology, Paris.
2. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1987: *Manual on Drainage in Urbanized Areas*. Volumes 1 and 2, Studies and Reports in Hydrology No. 43, Paris.
3. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1991: *Manual on Urbanization Effects on Hydrology and Water Quality*, St. Petersburg.
4. Chow, V. T. (ed.), 1964: *Handbook of Applied Hydrology*. Mc Graw-Hill, New York.
5. Watkins, L. H., 1962: *The Design of Urban Sewer Systems*. Technical Paper 55, Road Research Laboratory, London.
6. Terstriepl, M. L. and Stall, J. B., 1969: Urban runoff by the road research laboratory method. *Journal of the Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 95, HY6, pp. 1809–1834, Discussion Vol. 96, pp. 1100–1102, 1625–1631, 1879–1880; Vol. 97, pp. 574–579.
7. Fleming, G., 1975: *Computer Simulation Techniques in Hydrology*. Elsevier, New York.
8. Marsalek, J., 1976: *Urban Hydrological Modelling and Catchment Research in Canada*. Technical Bulletin No. 98, Environment Canada, Canada Centre for Inland Waters, Burlington, Ontario.
9. Maksimovic, C. and Radojkovic, M., (eds.), 1986: Urban drainage modelling. *Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data*, 9–11 April 1986, Dubrovnik, Yugoslavia.



## ГЛАВА 55

### ОРОШЕНИЕ И ОСУШЕНИЕ

#### 55.1            **Орошение**

Главная цель управления оросительной системой — получение максимальных урожаев с объема воды, потребляемого системой. В практике используются четыре основных метода орошения — поверхностное, путем разбрызгивания, подповерхностное и капельное или струйное. Там, где вода является большим дефицитом и дорого стоит, использование капельного или струйного орошения может стать предпочтительным.

Потребляемая вода необходима для:

- a) удовлетворения потребности в воде для сельскохозяйственных культур, которая определена Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) [2] как:  
«...слой воды, необходимый для возмещения потерь воды на испарение с поверхности здоровых сельскохозяйственных культур, выращиваемых на больших полях при отсутствии ограничений в отношении почвенных условий, включая отсутствие дефицита почвенной влаги и ограничения по плодородию почвы при достижении максимально возможной продуктивности в данных природных условиях...»;
- b) возмещения потерь, вызванных:
  - i) испарением с дикой растительности;
  - ii) испарением с увлажненных частей растений и зеркала почвенных вод;
  - iii) испарением с влажной поверхности почвы;
  - iv) дренированием почвенных вод;
  - v) фильтрацией, просачиванием и испарением из соответствующих водохранилищ и водораспределительных каналов.

Управление водными ресурсами орошаемых земель нацелено на удовлетворение потребностей в воде сельскохозяйственных культур при наименьших ее потерях.

#### 55.1.1        **Потребности в воде сельскохозяйственных культур**

Потребности в воде сельскохозяйственных культур обычно оцениваются либо на основании данных об испарении и их физиологических характеристиках, либо, с недавнего времени, на основании прямых измерений состояния почва — вода или физиологического давления растений.

В публикации ФАО [2] описано, как данные об испарителях, данные о радиации, методы Пенмана и Бланея—Криддла могут быть использованы для расчета испаряемости с поверхности сельскохозяйственных культур, по величине которой с помощью соответствующего коэффициента оцениваются потребности в воде для той или иной сельскохозяйственной культуры. Дополнительная информация о первых трех методах представлена в главах 9 и 38. В бывшем Советском Союзе широко применялся тепло-водобалансовый метод, основанный на данных стандартных гидрометеорологических наблюдений и разработанный Государственным гидрологическим институтом [1].

#### 55.1.1.1 Метод Бланея—Криддла

Метод Бланея—Криддла является одним из наиболее широко используемых для оценки потребностей в воде для сельскохозяйственных культур. Этот метод применяется, согласно FAO *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements* [2] (Руководство ФАО для прогнозирования потребностей сельскохозяйственных культур в воде), для расчета суммарного испарения с сельскохозяйственных полей по данным измерений температуры воздуха. В первоначальном варианте метода Бланея—Криддла использовались данные о температуре воздуха и продолжительности светлого времени суток (в процентах) в качестве климатических переменных для предсказания влияния климата на суммарное испарение. Эмпирически определяемый коэффициент безвозвратного водопотребления сельскохозяйственных культур затем используется для определения потребности в воде, которая оценивается как количество воды, потенциально необходимое для обеспечения суммарного испарения с сельскохозяйственных полей при условии неограниченного водопотребления растениями.

Однако потребности растений в воде будут сильно меняться в разных климатических условиях при одной и той же температуре воздуха, например: в условиях очень сухого и очень влажного климата, или при безветрии и в ветреную погоду. Таким образом, влияние климатических условий на потребности растений в воде не ограничивается только температурой воздуха и продолжительностью светлого времени суток. Следовательно, коэффициент водопотребления будет изменяться не только в зависимости от вида культуры, но также и от климатических условий. Его значение зависит от времени и места определения и для его оценки обычно требуется проведение местных полевых экспериментов.

Коэффициент водопотребления  $f$  по Бланею—Криддлу рассчитывается следующим образом:

$$f = p (0,46 t + 8,13), \quad (55.1)$$

где  $p$  — средняя за сутки доля часов светлого времени, %, для данных месяца и широты;  $t$  — среднесуточная температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ , для рассматриваемого

месяца. Значение коэффициента  $f$  является усредненным для данного месяца и выражается в  $\text{мм}\cdot\text{сут}^{-1}$ . Метод Бланея—Кридла должен применяться только в случае отсутствия каких-либо климатических данных, кроме данных о температуре воздуха. Степень эмпиризма при любом определении суммарного испарения на основании единственного метеорологического фактора неизбежно высока. Только в том случае, когда погодные условия, для которых осуществляется расчет коэффициента  $f$ , соответствуют реальным, возможна положительная корреляция между коэффициентом  $f$  и суммарным испарением сельскохозяйственных культур.

Метод Бланея—Кридла должен, как правило, применяться для расчета среднесуточного суммарного испарения за периоды не менее одного месяца. Если проверка преобладающих условий погоды, например: минимальной влажности воздуха за дневные часы, отношения действительного числа часов солнечного сияния к максимально возможному и ветрового режима за дневные часы для 2-х метровой высоты — не может быть выполнена, то результаты расчетов по рассматриваемому методу могут оказаться весьма сомнительными. Таким образом, необходима значительная осторожность при использовании этого метода, так как для конкретных месяцев реальное количество часов солнечного сияния может сильно меняться от года к году. Однако предполагается, что суммарное испарение с использованием рассматриваемого метода должно рассчитываться прежде всего для каждого календарного месяца и каждого года, для которых имеются данные наблюдений за температурой воздуха, а не по усредненным за несколько лет данным.

Этот метод не должен использоваться для расчетов в экваториальных районах, где температура воздуха остается относительно постоянной, в то время как другие климатические характеристики изменяются. Он также не должен использоваться для территорий малых островов, где температура воздуха является обычно функцией температуры поверхности окружающей остров морской воды и мало зависит от сезонных изменений радиационных характеристик. На больших высотах уровни радиации за дневные часы могут быть выше тех, которые принимались при разработке метода. Точно так же при высокой изменчивости продолжительности солнечного сияния в переходные месяцы весны и осени, например в условиях муссонного климата и климата средних широт, применение рассматриваемого метода может привести к неверным результатам.

#### 55.1.1.2 *Почвенная влага*

Данные измерений тензиометром и нейтронным влагомером используются для наблюдений за изменениями почвенной влаги и для практических расчетов, основанных на использовании измерений дефицита почвенной влаги. Они также могут быть использованы непосредственно для регулирования и управления режимом оросительных систем путем включения или

отключения подачи воды при достижении определенных уровней почвенной влаги [3, 4]. Детальная информация по использованию этих приборов приведена в главе 15.

#### 55.1.1.3 *Качество воды*

Вода для орошения требуется не только в достаточном количестве, но и должна соответствовать определенным критериям качества. Растения особенно чувствительны к содержанию растворенных солей в воде, применяемой для орошения. Высокое содержание соли в воде и почве, а также нерегулярное орошение, могут создать проблемы засоления орошаемых земель, что является широкораспространенным явлением во многих районах мира.

#### 55.1.2 *Потери воды*

Потери воды связаны с особенностями устройства ирригационной сети и могут быть минимизированы в процессе управления водораспределением, что может привести к значительной экономии средств на эксплуатационные расходы. Дренаж почвенных вод не должен рассматриваться лишь как потери воды. Минимальный дренаж необходим для извлечения накопившихся в почве солей. Там, где сезонных дождей недостаточно для вымывания накопившихся солей, следует увеличить норму внесения удобрений, что благоприятно отразится на урожае и на потребностях в воде для предупреждения засоления. Подробности о том, как это увеличение может быть рассчитано на базе известного качества воды, применяемой для орошения, и потребностей в воде для сельскохозяйственных культур, представлены в работе [2].

Выбор способа полива будет также определять потери на испарение. Системы, представленные дождевальными установками, будут увлажнять поверхность растений, и интенсивность потерь воды, перехваченной растениями, вероятно будет выше (для высоких растений во много раз выше) транспирации растений без полива.

Поверхностное орошение будет приводить к потерям на испарение с увлажненной поверхности почвы, но они, вероятно, не составляют существенную часть потребностей растений в воде, если только поверхность почвы не поддерживается во влажном состоянии в течение продолжительного времени, как в случае рисовых полей. Более серьезная ситуация складывается при необходимости подачи дополнительного количества воды, при поливе по бороздам, для обеспечения потребностей растений в воде. В этом случае потери дренажных вод могут быть большими и более изменчивыми по территории.

Что касается капельного или струйного орошения, то здесь имеется огромный потенциал по рациональному использованию воды, что свидет к минимуму как потери на испарение с поверхности почвы, так и потери при дренаже сверх потребностей

в воде для предупреждения засоления. Благодаря размещению точек капания непосредственно у сельскохозяйственной культуры, сводится к минимуму рост сорняков, а также потери на испарение с их поверхности. Системы капельного орошения могут использоваться как при схемах широкомасштабного орошения, так и при маломасштабных схемах гравитационной подачи воды для орошения участков мелких владельцев. За исключением подповерхностного орошения, которое во многих случаях может быть экономически неэффективным, капельное орошение представляет огромный потенциал для рационального использования водных ресурсов [5].

## 55.2        **Осушение сельскохозяйственных земель**

### 55.2.1      **Определение**

Осушение сельскохозяйственных земель — устранение избытка подземных или поверхностных вод для создания благоприятных условий для роста растений. Поверхностный дренаж может удалять избыток осадков с поверхности почвы с такой интенсивностью, что будут предотвращены длительные периоды подпруживания или затопления без чрезмерной эрозии, в результате чего пастбища и поля будут иметь наилучшие условия увлажнения. Информация по проектированию осушительных работ на малых водосборах приведена в главе 54.

Подповерхностный дренаж снижает уровень воды таким образом, что вода не препятствует развитию корневой системы. Эта мера способствует также вымыванию солей из почвы, поддерживая в ней надлежащий солевой баланс. Детальному рассмотрению этого вопроса посвящена книга Ричардса и Марша *Irrigation Based on Soil Section Measurements* [4] (Режимы орошения, основанные на данных измерений по почвенным колонкам).

### 55.2.2      **Факторы, воздействующие на осушение**

Сельскохозяйственный дренаж должен варьироваться в зависимости от климатических, геологических и топографических условий, а также в зависимости от почв, вида сельскохозяйственных культур и методов ведения сельского хозяйства. Явные признаки неправильно проведенных дренажных работ проявляются в виде: увлажненности поверхности почвы, отсутствия растительности, появления нежелательных видов растительности, таких, как болотная трава, осока, болотные виды деревьев, неравномерности окраски и высоты сельскохозяйственных культур, а также в виде неравномерного цвета почвы и отложения солей на ее поверхности. При возведении искусственных препятствий топография, геология и почвы на участке строительства и прилегающих к нему местах могут оказаться в таких условиях, которые будут препятствовать стоку воды, что явится причиной плохого дренажа в этих местах. Факторы «строительной площадки», воздействующие на дренаж могут быть разбиты на несколько категорий. Они могут воздействовать отдельно или в различных сочетаниях. Некоторые из наиболее важных характеристик приведены ниже:

- a) отсутствие естественного пути оттока или отсутствие впадины, позволяющих воде стечь. Такие места являются обычными для территорий, покрытых ледником, и прибрежных равнин, где естественные дренажные системы находятся в процессе развития;
- b) отсутствие достаточного уклона поверхности для стекания воды. Такие места могут быть найдены в углублениях земной поверхности, покрытой ледником, выше сооружений и природных барьеров в пойменных долинах, а также выше плотин;
- c) низкая проницаемость почвы, ограничивающая нисходящее движение воды. Многие почвы подстилаются тяжелыми по механическому составу слоями, скальными породами или плотными (слабопроницаемыми) грунтами ниже корневой зоны растений;
- d) искусственно создаваемые препятствия, такие, как дороги, заборы, плотины, насыпи, мосты, а также водоотводящие трубы, имеющие недостаточную пропускную способность, которые препятствуют или ограничивают сток воды;
- e) естественные запруды, которые вызывают накопление воды в достаточном количестве, усугубляя проблему дренажа;
- f) проблемы подповерхностного дренажа на орошаемых территориях, вызывающие потери на просачивание в глубинные слои почвы и потери на фильтрацию из системы каналов и небольших водораспределительных сетей. На потери, связанные с глубоким просачиванием при орошении, приходится обычно от 20 до 40 % объема использованной воды. Потери на фильтрацию из каналов и распределительных сетей изменяются в широких пределах и могут составлять от 0 до 50 % используемой воды.

В большинстве видов почв в засушливых районах содержится некоторое количество солей, концентрация которых изменяется от слабой до сильной. В условиях высокого стояния уровня грунтовых вод, вызванного глубоким просачиванием воды при орошении, происходит накопление солей в корневой зоне. Одной из основополагающих функций подповерхностного дренажа является понижение горизонта соленакопления ниже корневой зоны. Многие работы по подповерхностному дренажу в аридных районах выполняются фактически для регулирования солености почв.

Не существует опасности переосушения большинства почв с плохим внутренним дренажем при проведении подповерхностного дренажа. Тесное расположение дрен в почвах, находящихся в плохих физических условиях, способствует росту растительности, необходимой для оструктуривания почвы. На тех же почвах, находящихся в хороших физических условиях, может не потребоваться проведение таких интенсивных работ по дренированию. Удаление свободной воды в почве снижает сверх нормы влагу, удерживаемую в ней под действием капиллярности. Дренаж не удаляет капиллярную воду, потребляемую растениями. Глубина дрен контролирует высоту водного зеркала. Если водное зеркало находится низко в почвах с низким капиллярным всасыванием, влага может не поступать вверх к корневой зоне. Такие условия желательны на орошаемых соленных, солено-щелочных и щелочных почвах.

Существует возможность переосушения некоторых сверхплесчаных почв, некоторых торфяных и унавоженных территорий. Эти почвы имеют особый режим уровня воды, который обеспечивает наилучшие условия для роста растений. Эта особенность должна рассматриваться при проектировании дренажной системы.

### 55.2.3 *Эффективность осушения сельскохозяйственных земель*

Удаление несвязанной воды из почвы содействует деятельности бактерий, что является необходимым условием для производства питательных веществ при свободном проникновении воздуха в почву. Корни растений так же, как и почвенные бактерии, должны получать кислород. Осушение обеспечивает такую возможность посредством создания воздушного пространства в почве. Осадки, проходя через почву, удаляют двуокись углерода и пропускают свежий воздух для заполнения пор. Таким образом, осушение обеспечивает необходимую аэрацию почвы.

Поверхностный дренаж быстро удаляет задержанную на поверхности воду, позволяя оставшейся гравитационной воде двигаться сквозь почву.

Удаление несвязанной воды с помощью дренажа позволяет почве более быстро прогреваться, так как для повышении температуры увлажненной почвы требуется больше тепловой энергии. Почвенное тепло способствует жизнедеятельности бактерий, которые усиливают производство питательных веществ и рост растений. Почвы, которые весной раньше прогреваются, могут быть раньше засажены. В этих почвах также обеспечены лучшие условия для созревания семян.

Снижение уровня подземных вод улучшает рост корней. Например, если несвязанная вода удалена только из верхнего 25-сантиметрового слоя почвы, питание корневой системы растений будет происходить лишь в этой ограниченной области, но если вода удалена из метрового слоя почвы, то весь этот слой может рассматриваться как корневая зона, из которой растения могут получать питательные вещества и влагу.

### 55.2.4 *Основные виды осушения*

Осушение осуществляется за счет установившегося или постепенно ускоряющегося потока воды, движущегося под действием силы тяжести, посредством искусственного отвода воды от участка или сочетанием этих двух приемов.

#### 55.2.4.1 *Рельефный дренаж*

Установившийся или постепенно ускоряющийся поток излишней воды, удаляемой в пределах участка или за пределы участка, характеризуется как «рельефный дренаж». Поверхностные воды отводятся системами каналов и дрен. Подповерхностные воды удаляются с помощью почвенного дренажа, представленного боковыми дренами, расположенными параллельно или почти параллельно потоку грунтовых вод.

#### 55.2.4.2 *Перехватывающий дренаж*

Перехватывающие каналы или дрены, расположенные поперек потока подземных вод (или фильтрующихся вод), первоначально оборудуются для перехвата подповерхностного стока, направленного вниз по склону. Несмотря на то что этот вид дренажа перехватывает и отводит как поверхностный, так и подповерхностный сток, удаление поверхностных вод обычно рассматривается как отводной дренаж, а удаление подповерхностных вод как перехватывающий дренаж.

#### 55.2.5 *Способы искусственного осушения*

##### 55.2.5.1 *Поверхностное осушение*

Поверхностный дренаж может быть осуществлен посредством сооружения открытых канав и искусственных углублений земной поверхности для движения воды к распределительным системам. Осушение этим способом применяется в равнинных условиях, где:

- a) почвы имеют низкую водопроницаемость по глубине, например слабопроницаемые глины;
- b) тонкий поверхностный слой почвы (от 20 до 50 см) располагается над слабопроницаемой подпочвой или скальными породами;
- c) почвенные условия благоприятны для подповерхностного дренажа, но отсутствует свободный выход для отводимых вод;
- d) подповерхностный дренаж не является экономически выгодным;
- e) поверхностный дренаж дополняет подповерхностный дренаж.

##### 55.2.5.2 *Подповерхностное осушение*

Подповерхностный дренаж может быть произведен с помощью различных типов закрытых дрен, кротовых дрен и открытых дрен (дренажных канав). Подповерхностный дренаж применяется к насыщенным почвам, где физически обосновано и экономически выгодно применение закрытых дрен для удаления несвязанной воды из корневой зоны. Плодородие почвы должно быть таким, чтобы хорошо проведенное осушение отразилось на получении дополнительного урожая, что оправдывает расходы на сооружение дрен.

При проектировании подповерхностных систем необходимо, чтобы была установлена связь между количеством излишней воды, поступающей в почву, проницаемостью почвы и нижележащего подпочвенного слоя, а также потребностью культур в воде. Обычно тонкодисперсные почвы обладают низкой водопроницаемостью. В таких почвах поровые пространства настолько малы и так заполнены коллоидными веществами, что поток гравитационных вод в дрены затруднен. Это приводит к удалению несвязанной воды только с очень ограниченной площади.

В некоторых песчаных, торфяных и унавоженных почвах поровые пространства большие и движение воды более быстрое. Высокая влажность этих почв объясняется стоянием уровня подземных вод, особенно весной, на неорошаемых площадях и в понижениях, или после сезона орошения — на орошаемых землях. Такая ситуация должна исправляться путем осушения для того, чтобы получать наивысшие урожаи. Почвы таких видов могут успешно осушаться, но во многих случаях возникают проблемы с устройством дренажных систем и их эксплуатацией.

В некоторых легких песчаных почвах, которые содержат недостаточное количество коллоидных веществ для удержания частиц вместе, существует опасность чрезмерного поступления песчаных частиц в дрены. Такие почвы требуют особой предосторожности при создании дрен. Открытые канавы подповерхностного дренажа в этом случае могут быть более приемлемыми.

Применительно к торфяным и унавоженным почвам, отличающимся тем, что мелкие почвенные частицы проникают в дрены, существует опасность смещения керамических дрен из-за неустойчивого состояния почвы, и возникает необходимость в повышении устойчивости почвы при устройстве нового дренажа. По этой причине рекомендовано, чтобы осушение таких почв закрытыми дренами откладывалось до тех пор, пока не будет решён данный вопрос. Кротовый дренаж или открытые канавы могут быть использованы для первоначального осушения таких типов почв.

В очень пористых почвах, таких, как крупнозернистые пески и некоторые торфяники, чрезмерное понижение уровня грунтовых вод может вызвать дефицит влаги в течение засушливого периода. Такие почвы, будучи очень пористыми, имеют низкое капиллярное всасывание и не способны подавать воду к корневой системе определенных культур, если уровень водного зеркала опускается значительно ниже корневой зоны.

Существуют и другие почвенные условия, когда устройство дрен рискованно или непрактично. Наличие в некоторых почвах валунов или камней приводит к чрезмерно высокой стоимости дренажа. В тех почвах, у которых верхний слой удовлетворительный, а нижележащий представлен неустойчивым песком на той глубине, где должны быть уложены дрены, устройство дренажа отличается большей трудоемкостью или совсем невозможно. В других почвах, содержащих глауконит, окись железа или окись магния, применяют укороченные отрезки дрен или дрены с отверстиями против их закупоривания из-за высокой химической активности почв.

#### 55.2.6 *Экономические факторы*

Некоторые почвы могут быть пригодны для осушения, но устройство дренажа в них настолько дорого, что извлекаемая выгода не оправдывает затрат. В большинстве

случаев расположение дрен на расстоянии менее 15 метров друг от друга для рельефного дренажа не может быть оправдано, если это не дает повышения урожая или не может быть получена существенная выгода. Косвенную выгоду следует рассматривать, когда, например, усыхание фруктовых садов вызывает необходимость устройства разбрызгивания, которое используется без осушения почвы.

Некоторые почвы могут быть осушены удовлетворительно, но повышение их продуктивности оказывается настолько низким, что урожай не оправдывают затрат. Могут отсутствовать подходящие водохранилища, и для их создания потребуются чрезмерно высокие расходы.

В ряде случаев финансовые возможности фермера не разрешат ему залезать в долги, даже если возврат средств, вложенных в устройство дренажа, произойдет в течение 5–10 лет за счет повышения урожая и снижения стоимости продукции.

### Список литературы

1. Харченко С. И. *Гидрология орошаемых земель*. Л., Гидрометеоиздат, 1975.
2. Food and Agriculture Organization, 1975: *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements* (J. Doorenbros and W. O. Pruitt). Irrigation and Drainage Paper No. 24.
3. Campbell, G. S. and Campbell, M. D., 1982: Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Advances in Irrigation*, Vol. 1, pp. 25–42.
4. Richards, S. J. and Marsh, A. W., 1961: Irrigation based on soil section measurements. *Proceedings of the Soil Science Society*, pp. 65–69.
5. Hodnett, M. G., Bell, J. P., Ah Koon, P. D., Soopramanien, G. C. and Batchelor, C. H. L., 1990: The control of drip irrigation of sugarcane using ‘index’ tensiometer: some comparisons with control by the water-budget method. *Agricultural Water Management*, special issue.

## ГЛАВА 56

### ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

#### 56.1       **Общие положения**

Энергия является одним из наиболее важных источников удовлетворения физических потребностей современного общества и обеспечения его экономического развития. Энергетические потребности непрерывно возрастают. До настоящего времени мировой энергетический рынок почти полностью зависел от невозобновляемых, но низких по стоимости запасов природного топлива. Энергия, вырабатываемая гидроэлектростанциями всего мира, обеспечивает приблизительно одну пятую часть мировой энергии.

Главным условием выработки электрической энергии является наличие водных ресурсов, поэтому гидрологические данные и информация являются неотъемлемой частью планирования использования как возобновляемых, так и невозобновляемых источников электрической энергии. Хотя вода является одним из двух необходимых компонентов при производстве гидроэлектрической энергии, она не теряется безвозвратно и не загрязняется. При выработке термоэлектрической энергии вода требуется практически на всех технологических этапах — от бурения испытательных скважин при добыче нефти и газа до превращения ископаемого и ядерного топлива в электрическую энергию на тепловых энергостанциях. Использование воды в этих случаях приводит к ее безвозвратному потреблению и/или загрязнению.

В последнее время в связи с непрерывным ростом потребностей в электрической энергии возникли новые проблемы. Это — поиск дополнительных водных источников для производства энергии и влияние энергетики на климат и окружающую среду.

#### 56.2       **Гидроэнергетика**

Гидравлическая энергия рек, являющаяся источником электрической энергии, непрерывно возобновляется в процессе гидрологического цикла. Энергия текущей воды представляет иногда уникальную возможность развития национальной экономики — ее устойчивость, которая была определена комиссией Брундтланд как: «экономическая деятельность, которая удовлетворяет нужды современного производства без ущерба способностям будущих поколений удовлетворять

свои нужды» [1]. Гидроэнергетические установки разнообразны не только из-за различия природных условий, к которым они должны быть адаптированы, но также из-за разнообразия обстоятельств, связанных с выработкой энергии и ее использованием. Гидроэлектростанция часто эксплуатируется в составе многоцелевого проекта, который предназначен для решения широкого круга водохозяйственных задач, например: регулирования паводков, судоходства, ирригации, городского и промышленного водоснабжения, рекреации, а также разведения рыб и диких животных. Редко проект предназначается только для локальной территории. Обычно рассматривается речной бассейн в целом с его региональными, национальными и даже международными проблемами. На стадии планирования любого проекта должны учитываться все водохозяйственные потребности региона и рассматриваться пути удовлетворения этих потребностей. Воздействие предлагаемого гидроэнергетического строительства на природные ресурсы и возможности удовлетворения различных потребностей региона должны быть тщательно оценены.

Несмотря на то что гидроэнергетические проекты в течение последней четверти столетия становились все более крупными, малые гидростанции мощностью вплоть до нескольких мегаватт (МВт), могут вырабатывать дешевую энергию, будучи размещенными на малых водотоках, или часто могут быть объединены с существующими ГЭС или искусственными каналами.

### 56.2.1 *Преимущества*

Несмотря на то что за счет развития гидроэнергетики во всем мире обеспечивается относительно малый процент энергетических потребностей, важность производства гидроэнергии — относительно высока по сравнению с другими источниками энергии. Особенно важным является развитие гидроэнергетики как экономического стимула в развивающихся странах и как значимой части комплексных энергетических систем в промышленно развитых странах. Значимость гидроэнергетики не будет уменьшаться по следующим причинам:

- a) гидроэлектрическая энергия обязана своим происхождением непрерывно возобновляемому процессу воспроизводства природных ресурсов за счет энергии Солнца, который поддерживает гидрологический цикл;
- b) гидроэлектрическая энергия не загрязняет природную среду — ни значительное тепло, ни вредные «парниковые газы» не выделяются при ее выработке;
- c) КПД гидроэлектростанций может быть близким к 90 %, тогда как тепловые станции на жидком и твердом топливе имеют КПД не более 30–40 %;
- d) гидроэлектростанции имеют долгий эксплуатационный срок;
- e) технология выработки энергии на ГЭС является совершенной, обеспечивающей надежную и гибкую эксплуатацию, а оборудование ГЭС легко адаптируется к местным условиям;
- f) вода в водохранилище обеспечивает «хранение» энергии и может быть доступна для других целей;

- g) гидроэлектростанции способны реагировать в течение секунд на изменения требований к выработке энергии;
- h) производство гидроэнергии не имеет такой стоимости, как топливо, а низкая цена эксплуатации и технического обслуживания ГЭС является существенным доказательством незначительной инфляции.

Конечно, последствия гидроэнергетического развития могут быть предметом геополитических спекуляций, связанных, например: с затоплением вышеуказанных территорий, с созданием верхнего бьефа и/или хранилища воды, а также с воздействиями на окружающую среду, например с изменением экологического состояния рек и озер.

#### 56.2.2 Потенциал участка

Гидроэлектрическая энергия вырабатывается посредством преобразования энергии воды, падающей с более высокого на более низкий уровень, в механическую энергию, действующую на лопасти генератора турбины и затем в электрическую энергию через возбуждение ротора и статора генератора. Энергетический потенциал участка в киловаттах определяется по формуле

$$P = 9,81 Q h e, \quad (56.1)$$

где  $Q$  — расход воды,  $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $h$  — напор высоты падения воды, м;  $e$  — показатель эффективности работы станции. Используемый напор может быть создан за счет естественных факторов регулирования режима водотока, таких, как крутые уклоны, пороги и водопады, или создан искусственно посредством постройки плотины, которая может создать водохранилище значительного объема или площади, используемые для регулирования или изменения естественного режима водотока. Доступным для регулирования или изменения с учетом потерь является сток водотока, на котором сооружена ГЭС, однако этот сток может быть изменен несколькими способами:

- a) посредством регулирования;
- b) посредством создания водохранилищ;
- c) переброской из прилегающих речных бассейнов;
- d) закачкой воды в верхнее водохранилище с последующей выработкой энергии.

Выработка энергии, устанавливаемая для расчетного створа, зависит не только от размера и режима водотока и имеющегося напора или падения, благодаря которым энергия потока может быть использована, но также от размера имеющейся регулирующей емкости, протяженности подводящих каналов, эксплуатационных ограничений в интересах других водопользователей и, что особенно важно, от показателей и характеристик того энергетического рынка, который должен быть удовлетворен.

Полный напор на гидроэлектростанции определяется как разница между уровнем воды верхнего бьефа и уровнем воды в отводящем канале при работающей ГЭС. Этот напор будет изменяться с изменением стока реки, объема воды в водохранилище или водоеме и уровней воды. При рассмотрении технико-экономического обоснования проекта важно знать среднее значение полного напора, которое может быть принято для расчета средней выработки энергии, а также минимальное его значение, обеспечивающее устойчивую поставку энергии потребителям по их требованию. Среднее значение полного напора зависит от стока в реке ниже ГЭС. В условиях низкого стока уровень воды в отводящем канале будет низким, а напор — близким к его максимальному значению, тогда как при паводках уровень воды в отводящем канале будет высоким, а напор — близким к минимальному значению. Низконапорная станция на реке с периодически повторяющимися большими паводками может иметь настолько малое значение полного напора, что работа станции будет парализована до такой степени, что она не сможет обеспечить надежную выработку энергии, и ее эксплуатация будет прекращена.

Несмотря на то что большая часть полного напора может быть использована для производства электрической энергии, существуют гидравлические потери в подводящих галереях, которые направляют воду к турбинам, а также потери в отводных галереях, по которым вода поступает от турбин в отводящий канал. Отводные галереи спроектированы таким образом, что большая часть кинетической энергии воды используется до ее выхода из ротора турбины. Указанные выше потери могут контролироваться в пределах определенных границ, поскольку они убывают с увеличением размера галерей или выбранного проектного решения.

Эффективный напор на ГЭС определяется как полный напор минус все потери на входе в турбину реактивного типа за счет завихрений и на выходе из отводной галереи или минус потери в основании насадок в случае турбины импульсного типа. Таким образом, эффективный напор есть функция полного напора и расхода воды через плотину (т. к. потери скорость — напор увеличиваются приблизительно пропорционально квадрату расхода) так же, как и стока в реке в нижнем бьефе непосредственно у плотины.

Для того чтобы обеспечить надежную оценку выработки энергии в выбранном створе, необходимы данные о речном стоке вместе со следующей существующей информацией и гидрологическими данными:

- a) ежедневные и/или среднемесячные расходы воды за достаточно продолжительный период, но не менее 10 лет;
- b) данные о перебросках речного стока выше створа плотины или о водозаборах;
- c) кривые обеспеченности речного стока;
- d) площадь водосбора;

- e) потери на испарение с поверхности проектируемого водохранилища;
- f) зависимость уровень—расход для створа проектирования;
- g) сбросной гидрограф расчетного паводка;
- h) тарировочные кривые для плотины водослива и водовыпуска;
- i) цели проектирования, имеющийся запас воды и правила эксплуатации;
- j) потери на фильтрацию, рыбохозяйственные требования и переброски воды из водохранилищ;
- k) информация о продолжительности стояния уровней в водохранилище;
- l) данные о ежегодных максимальных расходах для оценки рисков, связанных с пропуском воды через водосливы;
- m) требования к минимальному стоку в нижнем бьефе, непосредственно у плотины.

Примеры методических подходов, используемых при анализе гидрологических данных с целью получения информации, необходимой для проектирования, даны в части D настоящего Руководства. В Справочном наставлении по ГОМС содержится информация об имеющемся программном обеспечении для реализации вышеуказанных методов на ЭВМ.

Вероятно, наиболее полезным средством при технико-экономическом обосновании гидроэнергетических объектов является кривая обеспеченности стока (раздел 35.2). Кривая обеспеченности стока, построенная по среднесуточным расходам, будет более надежной в зонах крайних обеспеченностей, чем построенная по среднемесечным данным. Различия будут более заметными для водотоков с малой регулирующей емкостью или без нее. Площадь, ограниченная кривой, соответствует среднему стоку водотока за рассматриваемый период. Очень полезной формой кривой обеспеченности стока является безразмерная кривая, которая может быть получена, если ось ординат выразить через отношение к среднему стоку. Так как общая форма этой кривой почти одинакова для различных водотоков в однородном гидрологическом районе, такой способ позволяет аппроксимировать кривую обеспеченности только по данным о среднем стоке реки. Данный подход может потребоваться, если имеется очень мало или вовсе нет данных наблюдений за речным стоком, но имеются данные об осадках и основных гидрологических условиях, позволяющие получить надежные оценки среднегодового стока для изучаемого водотока и данные о стоке других водотоков региона, необходимые для построения кривых обеспеченности.

Производительность турбин обычно устанавливается исходя из предположения, что необходимый сток будет иметь место от 20 до 40 % времени. Однако проектная производительность станции будет определяться сравнением стоимости проектирования в различных створах, выходной мощности и доли этой энергии в системе. Доля гидроэнергии в энергетической системе зависит от стоимости того же объема энергии, полученной при использовании альтернативных источников. С другой стороны, стоимость энергии меняется во времени.

В периоды малого потребления энергии, например ночью, только наиболее эффективные станции системы будут действовать, чтобы получить небольшую прибыль от производства энергии. При гораздо больших потребностях дневного времени менее эффективные станции также будут задействованы, чтобы получить большую прибыль в течение этого времени суток.

Площадь, ограниченная кривой обеспеченности водопропускного расхода турбины, будет определять среднегодовой сток, который может быть использован и который при эффективном напоре будет обеспечивать основу для расчета выработки энергии на предполагаемом оборудовании. Влияние регулирующей емкости будет проявляться в подъеме первого отрезка кривой обеспеченности (от среднего значения стока) и понижении левого ее отрезка. При обеспечении полного регулирования стока кривая обеспеченности для случая снижения объема водохранилища превратится в горизонтальную линию, соответствующую среднему стоку реки.

Регулирующая емкость позволяет обеспечить суточное и недельное регулирования стока в соответствии с меняющимися требованиями. Пиковый расход — это термин, используемый при суточном регулировании. Гидроэлектростанции особенно хорошо «срезают» пиковые расходы. Изменения нагрузки могут быть осуществлены за считанные секунды посредством изменения поперечного сечения водоводов. Такая возможность может означать значительную экономию топлива так же, как и значительно большую устойчивость снабжения энергией при эксплуатации объединенной системы с ГЭС и ТЭС. Однако, если водохранилище должно обеспечивать не только суточное и недельное регулирование, но также выработку значительно большего количества энергии в течение тех сезонов года, когда потребности в ней возрастают, расчет должен предусматривать создание емкости для сезонного регулирования. Например, во многих регионах самые большие потребности в энергии имеют место зимой, когда речной сток самый низкий. Обычное накопление в водохранилище высокого стока от снеготаяния во время весеннего стока может затем увеличить зимний сток. Иногда переходящий запас воды может быть обеспечен в водохранилище для использования во время продолжительных засушливых периодов в один год и более.

Определение соотношений накопление—сток является одним из основных элементов гидрологического анализа при проектировании водохранилищ (глава 52). Физические ограничения при проектировании могут быть связаны с размерами территории, которая подпадает под затопление, т. е. ограничения по максимальному уровню воды; могут быть ограничения по минимальному уровню воды из-за низкого расположения водозaborных сооружений, а также ограничения по пропускной способности гидротехнических сооружений и русла реки в нижнем бьефе. Ограничения могут также быть обусловлены необходимостью поддержания нереста рыбы или выживания тех видов дикой природы, которые зависят от

положения уровня воды. В северных регионах для сохранения ледяного покрова или предотвращения ледяных заторов может потребоваться установление соответствующего максимального расхода в течение зимнего периода.

Когда емкость водохранилища определяется местными условиями (это обычно имеет место), устойчивый сток, который поддерживается притоком с окружающей территории и имеющимися естественными емкостями, может быть определен с помощью анализа интегральных кривых (раздел 29.2). Устойчивый сток определяется как сумма полезного водохранилища и пригодного для использования притока в течение критического меженного периода. Сочетание двух последовательных умеренно засушливых лет может потребовать более серьезного обоснования, чем отдельно взятый очень засушливый год.

При планировании использования гидроэнергии и при проектировании ГЭС должна быть получена специальная кривая продолжительности, которая отражает продолжительность соответствующих напоров и расходов воды и соответствует КПД. Эта кривая выработки—продолжительности может быть получена путем применения уравнения (56.1) для выбранных точек ( $Q, h$ ) на соответствующих кривых продолжительности.

Другой эффективный метод для оценки гидроэнергетических ресурсов — это составление гидроэнергетического продольного профиля, который соответствует потенциальной энергии реки, которая может быть использована для выработки энергии в сухой или влажный год. Этот профиль основан на данных о расходах воды и соответствующих уклонах уровня (или графике выработки энергии).

### 56.2.3 *Диспетчерский график*

[К75]

Требования водопотребителей в отношении размера регулирующей емкости при многоцелевых проектах могут совпадать или быть конкурирующими, в связи с чем необходимо обеспечить наиболее рациональное распределение запасов воды, устранив конфликтные ситуации, насколько это возможно. С точки зрения выработки энергии желательно использовать воду в соответствии с требованиями потребителей электрической энергии посредством поддержания уровня воды в водохранилище так высоко, как это возможно. При орошении наибольшие потребности в воде приходятся на ирригационный сезон, а для коммунального и промышленного водоснабжения вода требуется в течение всего года. В большинстве случаев вода, использованная для выработки энергии, сбрасывается в реку и может быть повторно использована на нижерасположенных участках. Таким образом, нет существенного противоречия между производством энергии и водоснабжением, хотя в отношении других отраслей такие противоречия могут иметь место. Если, например, вода самотеком отводится из водохранилища по каналу для ирригационных целей, этот водоотвод будет в прямом противоречии с

выработкой энергии. Даже если возвратные воды с орошающего массива попадут в конце концов в реку, такое водопользование может быть в прямом противоречии с водозабором на нижерасположенном участке и требованиями навигации, поскольку значительное количество отведенной воды будет использовано на орошение безвозвратно, а качество возвратных вод может быть намного хуже забранной воды. Следовательно, применительно к многоцелевым водохранилищам расчет регулирующей емкости становится намного более сложной задачей. Каждая целевая функция добавляет сложности, поскольку каждый вид использования воды должен быть учтен, и конечный результат расчета должен быть получен в процессе оптимизации.

Диспетчерские графики или эксплуатационные требования должны быть разработаны для минимизации противоречий между требованиями потребителей. Диспетчерский график является руководством для эксплуатации водохранилища и обычно основан на детальном последовательном анализе различных критических сочетаний гидрологических условий и потребностей в воде. Когда выработка электрической энергии является главной целью эксплуатации водохранилища, требуется детальный анализ условий формирования стока для увязки этой задачи с другими видами использования водохранилища с целью определения средней проектной выработки электроэнергии. Также устанавливается размер устойчивой выработки энергии и выработка энергии вне критического периода, особенно когда полезный объем водохранилища достаточно большой, а ожидаемый напор может меняться в достаточно широких пределах. На различных действующих станциях могут быть предприняты попытки добиваться максимальной выработки энергии в период удовлетворения других пользователей. Когда оптимальная производительность достигнута, могут быть разработаны правила эксплуатации, которые могут быть опробованы во время критических меженных и паводочных периодов.

Простой диспетчерский график по производству энергии при одноточечном проекте будет давать сведения об уровне водохранилища или его объеме, необходимых для обеспечения устойчивой выработки энергии в любое время года. Разновидности диспетчерского графика могут быть представлены в виде верхней или нижней кривых, соответствующих запасу воды в водохранилище выше или ниже нормального подпорного уровня. Гидрологические прогнозы содействуют максимизации выработки энергии за счет минимизации сбросов воды. Ограничения сбросов воды в нижний бьеф могут быть необходимы там, где существует опасность затопления. Диспетчерский график может учитывать такие ограничения. Вероятностный анализ потребностей может быть применен для того, чтобы помочь оператору выбрать при назначении режима эксплуатации водохранилища верхнюю или нижнюю кривую на диспетчерском графике.

### 56.2.4 ***Качество воды***

Качество воды обычно не является главным вопросом при проектировании гидроэнергетических объектов. Оно может представлять интерес только по отношению к притоку либо оттоку. Современные оценки состояния окружающей среды свидетельствуют о том, что размеры деградации биомассы и снижение аэрации в водохранилище обычно занижаются. В некоторых реках тропических регионов вода может быть опасной по степени кислотности и агрессивной до такой степени, что способна разрушить лопасти ротора и другие части турбины. Высокое содержание наносов в речном потоке также может иметь значение при проектировании как фактор, ограничивающий полезный объем водохранилища, а также и нагрузку на неподвижные и врачающиеся элементы турбины.

### 56.3 ***Сопутствующие энергетические проекты***

Несмотря на то что при производстве электрической энергии вода, главным образом, используется для выработки энергии на ГЭС, она является неотъемлемым компонентом теплоэнергетики практически на всех технологических стадиях от бурения пробных скважин при разработке нефтяных и газовых месторождений до превращения ископаемого и ядерного топлива в электрическую энергию на ТЭС. Ниже приводятся руководящие материалы по количеству и качеству воды, требуемой для производства и безвозвратного потребления, и по качеству возвратных вод при реализации таких проектов. Таблица, представленная ниже, дает сводные сведения о требованиях к воде и о водопотреблении для ряда технологий, имеющих отношение к производству энергии.

#### 56.3.1 ***Производство энергии с использованием ископаемого и ядерного топлива***

Виды использования воды при производстве электроэнергии с использованием ископаемого и ядерного топлива сходны между собой. Во всех таких энергетических объектах вода используется в паровых турбинах и конденсаторах для удовлетворения основных служб, а также в питьевых и смешанных системах водоснабжения. Степень использования зависит от применяемых систем конденсаторного охлаждения и теплообменников. Для электростанций, работающих на угле, вода также необходима для транспортировки золы, исходя из потребности около  $0,00095 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МВт}^{-1}$ , соответственно для десульфурации (удаления серы) из топочных газов — около  $0,00019 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МВт}^{-1}$ . Тем не менее, единственным и наиболее важным видом использования воды является ее применение для охлаждения конденсаторов. Количество воды, требуемое для этих целей, обычно находится в пределах  $0,032\text{--}0,044 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МВт}^{-1}$  при условии роста температуры воды на  $8^\circ\text{C}$  после ее прохождения через конденсатор. Основными видами теплоотводящих систем являются: одноконтурный охладитель, испарительная

градирня и сухая градирня. Применение правил контроля за тепловым «загрязнением» водотоков приводит к отказу от использования одноконтурных охладителей. Испарительные градирни являются самым большим потребителем и дают самые большие ее потери. Сухие градирни рассеивают излишнее тепло более холодным воздухом непосредственно в атмосферу посредством теплообмена без дополнительного отвода тепла напрямую или после его использования потребителями, в естественный водоем. Однако энергетические объекты, использующие такую систему, требуют увеличенного потребления топлива и дополнительных капитальных затрат.

АЭС, как и любая сложная система, является объектом с широким набором возможных незапланированных проявлений, которые могут препятствовать ее нормальной работе и, в экстремальных случаях, угрожать здоровью и безопасности людей. Вероятность возникновения серьезных ситуаций является, несомненно, крайне малой с учетом высоких показателей безопасности АЭС и мер предосторожности, которые являются неотъемлемой частью проекта. В томе II публикации BMO *Meteorological and Hydrological Aspects of Siting and Operation of Nuclear Power Plants* [2] (Метеорологические и гидрологические аспекты размещения и эксплуатации АЭС) описаны различные типы АЭС, которые в настоящее время входят в состав многих энергетических систем. В ней также рассматриваются гидрологические и водохозяйственные проблемы, которые могут найти применение при планировании, проектировании, эксплуатации и ликвидации АЭС.

Принимая во внимание разнообразие и сложность рассматриваемых проблем, в публикации даются некоторые примеры методов, которые могут быть полезны при решении наиболее важных из них. Не только очень высокий, но также очень низкий сток имеют особое значение для эксплуатации и обеспечения безопасности АЭС. С точки зрения безопасности, высоконадежное водоснабжение необходимо для аварийной охлаждающей системы, охлаждения отработанного топлива, а также для окончательного поглощения тепла [3]. Особо важным является требование защиты против затопления от любого возможного источника, т. к. затопление может вызвать аварию общего характера из-за повреждения двух или более систем, что может снизить эффективность системы безопасности [4]. Поэтому крайне необходимо, чтобы самая лучшая система прогнозирования гидрологического режима водных объектов, имеющих отношение к эксплуатации АЭС, была применена и периодически выпускались обзоры гидрологического обоснования планирования и проектирования АЭС.

В большинстве энергетических проектов качество воды не является определяющим фактором, но оно может рассматриваться в качестве одного из факторов, определяющих размеры, характер проектирования, оптимальное положение объекта, привлекательность проекта. Состав воды, поступившей от различных источников, широко варьируется как по содержанию растворенных

### Обобщенные требования к воде со стороны энергетических объектов (кроме гидроэнергетики)

Процесс	Процесс водопотребления			Потребности в воде для производства энергетической продукции	
	Стандартная единица	Потребление воды $m^3$ на стандартную единицу продукции	Примечание	Стандартный показатель производства продукции	Потребность в воде $m^3$ на стандартный показатель производства продукции
	(продукция)	(характерные значения)		(продукция)	(характерные значения)
Добыча угля (поверхностная и подземная)*	тонна	0,01–0,06	–	млн т/год	0,0003 – 0,0019
Добыча угля (гидравлическая)*	тонна	0,08–0,14	составляет 15 %	млн т/год	0,0025 – 0,0044
Переработка угля*	тонна	0,4–1,5	составляет 10 %	млн т/год	0,0127 – 0,0475
Угольные шлаковые трубопроводы	тонна	0,95	–	млн т/год	0,0301
Разжижение угля	тонна	2,4–3,8	–	млн т/год	0,0761 – 0,1204
Выделение дегтя	баррель	0,88	–	баррель/день	$1,02 \times 10^{-5}$
Очистка сырой нефти	баррель	0,163	–	баррель/день	$1,88 \times 10^{-6}$
Электростанции на природном топливе	мегаватт	0,9–5,4	–	МВт	0,00025 – 0,0015
Атомные электростанции	в час		–	МВт	
	мегаватт	1,5	–	МВт	0,00043
Добыча урана					
— Онтарио и Ньюфаундленд	килограмм	0,67	низкосортная руда	т/год	$2,11 \times 10^{-5}$
— Саскачеван	килограмм	0,4	высокосортная руда	т/год	$1,27 \times 10^{-5}$
Производство метанола (синтез газа и биомассы)	тонна	1,75–3,5	составляет 14 %–25 %	т·сут <sup>-1</sup>	$2,03 \times 10^{-5}$ $4,05 \times 10^{-5}$

Источник: Acres International, 1982.

\*Производство угля подразделено на добычу и переработку. Поэтому при определении потребностей в воде при поверхностной, подземной или гидравлической добыче следует добавить объем воды, требуемой для переработки угля, чтобы определить общую потребность в ресурсах.

солей, так и газов. Поверхностные воды обычно содержат взвешенные вещества и часто органические вещества в растворенной или взвешенной форме, образующиеся либо в результате разложения растительных остатков, либо сброса сточных вод. Возрастающее использование синтетических моющих веществ, некоторые из которых неполностью разрушаются в процессе очистки сточных вод, привело к избытку этих химических веществ, существующих даже в системах коммунального водоснабжения. Дождевые воды в промышленных районах, где выбросы в атмосферу от сжигания угля и нефтепродуктов распространяются под действием ветра на значительные расстояния, могут иметь низкие значения pH и быть потенциально агрессивными. Большая часть таких вод, однако, может быть очищена до состояния, при котором они могут использоваться в охлаждающих конденсаторах, основных магистралях, для транспорта золы и удаления серы из топочных газов. В то же время для испарительных установок требуется очень чистая вода. Стоимость подготовки такой воды будет в основном расти пропорционально общему содержанию растворенных солей в природной воде.

На тепловых электростанциях, работающих на ископаемом топливе, формируются разнообразные потоки сточных вод, наиболее важными из которых являются сброс охлаждающих вод и аварийные сбросы. Самые большие потоки сточных вод формируются за счет охлаждающих одноконтурных охладителей. Применительно к тепловым электростанциям, работающим на каменном угле, приблизительно 6 000 британских тепловых единиц должны рассеиваться посредством охлаждения на каждый киловатт-час выработанной электроэнергии. Температура сбросных охлаждающих вод часто на 6–9 °C выше, чем температура воды в водоприемнике. С недавних пор градирни стали неотъемлемой частью многих энергетических установок с целью предотвращения теплового загрязнения естественных водотоков. На следующем месте по объему сточных вод на тепловых электростанциях, работающих на природном топливе, стоят продуваемые градирни испарительной охлаждающей системы. Продуваемые воды содержат большое количество растворенного кальция, магния, натрия, хлоридов и сульфатов. Они также содержат другие вещества, используемые для предотвращения коррозии.

Радиоактивные сточные воды имеют место при производстве ядерной энергии на АЭС, благодаря в значительной степени таким процессам, как просачивание, продувание, техническое обслуживание и т. д. Циркулирующая в реакторе вода используется как источник тепла, а продукты коррозии, образующиеся в системе, являются первичным источником радиоактивных изотопов в этой воде. Предписано, чтобы вода, используемая для целей охлаждения и как источник пара, была исключительно чистой, так как любые соли или другие примеси в воде могут захватить нейтроны и стать радиоактивными. Другим потенциальным источником радиоактивных изотопов в охлаждающей воде является расщепление продуктов, образованных внутри топливных элементов. Количество радиоактивных

изотопов в реакторной воде зависит, следовательно, от скорости коррозии, частоты разрушения покрытия топливных элементов, а также интенсивности удаления изотопов посредством конденсации и использования очистительных деминерализаторов реактора. Возможное присутствие радиоактивных изотопов в воде требует осторожности при очистке отработанных стоков. В первоначальной циркуляционной системе большие усилия требуются, чтобы снизить нарастание чрезмерной радиоактивности, вызванной либо радиоактивными примесями, либо продуктами коррозии. Первоначально забранная вода не сбрасывается, но часть ее удаляется, очищается и повторно используется в реакторе. Опасность коррозионного воздействия требует, чтобы кипящая вода содержала очень низкие концентрации кислорода и хлоридов. Это достигается деаэрированием и выпариванием воды для снижения уровней кислорода и хлоридов до значений соответственно меньших чем  $0,03$  и  $0,3 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ .

### 56.3.2 *Добыча и переработка угля*

Очень мало воды используется при открытом либо подземном способе добычи угля. Действительно, применение фильтрующей воды обычно нежелательно, и могут потребоваться значительные усилия и затраты для удаления ее из шахт. Обогатительные фабрики используют большое количество воды для очистки угля, однако обратные системы водоснабжения обычно требуют пополнения около 10 % подпиточной воды.

Шламовый способ добычи угля известен с предшествующего столетия. Шламовый трубопровод может быть экономичным при больших размерах и значительной протяженности, но при последующем отделении раздробленного угольного продукта, вода, перед сбросом в естественный водоток, должна быть очищена. Средства очистки будут зависеть от качества угля (т. е. от содержания серы, золы и минеральных веществ), предложенного для транспортировки химических добавок, необходимых для предотвращения коррозии в трубопроводе и сопутствующих установок, а также от химических коагулирующих веществ, используемых при обезвоживании.

Сток с территорий угледобычи содержит высокие концентрации металлов, взвешенных веществ и сульфатов от серного колчедана (пирита) и/или марказита, которые в основном сопутствуют угольным пластам, глинистым сланцам и песчано-каменистым осадкам. При взаимодействии с атмосферой эти минералы образуют серную кислоту и соединения гидроксида трехвалентного железа. Кислые рудничные воды могут образовываться за счет фильтрации через донные отложения прудов, терриконы отработанный породы и складированный уголь. Эти воды могут обладать высокой кислотностью ( $\text{pH}$  от 2 до 4) и содержать высокие концентрации алюминия, сульфатов, железа и следы тяжелых металлов.

Результатом вырубки лесов, прокладки общественных дорог в местах угледобычи, а также собственно переработки угля будет возрастающая эрозия, нитратное и катионное выщелачивание поступающих на эту территорию вод. Возможно увеличение биогенной нагрузки и мутности этих вод.

### 56.3.3 *Добыча и переработка урана*

При добыче урана открытым или подземным способом требуется небольшое количество воды, главным образом для питьевого водоснабжения. Количество воды, используемой непосредственно при добыче урана, является незначительным, т. к. она применяется в основном при влажном дроблении руды.

При переработке руды в концентрированных дробилках образуются сточные воды и выбросы как радиоактивные, так и нерадиоактивные. Твердые, жидкие и газообразные выбросы в окружающую среду в большей или меньшей степени зависят от управления технологическим процессом проводимых мероприятий по регулированию сточных вод.

### 56.3.4 *Производство нефтяных продуктов*

Водоснабжение и доступность водных источников, стоимость воды, сохранение энергии и вопросы окружающей среды — все это имеет отношение к нефтепереработке. Современные способы переработки нефти разработаны с целью снижения водозaborа до 1/50 части водозaborа старых одноконтурных систем. Предпочтение сейчас отдается воздушному охлаждению, нежели водному и многократному использованию воды (оборотное водоснабжение). Степень использования воды зависит от сложности очистки, которая напрямую связана с мощностью нефтеперерабатывающего производства — чем глубже степень перегонки нефти, тем сложнее очистка сточных вод. Удельный водозabor может измеряться в пределах  $0,1 - 3 \text{ м}^3\cdot\text{баррель}^{-1}$  в зависимости от размера, сложности и принятых подходов при проектировании объекта нефтепереработки.

Воды, участвующие в процессе добычи нефти и ее переработки, должны быть очищены перед их сбросом в естественные водотоки. Процессы очистки обычно заключаются в удалении твердых веществ и разделении суспензии на нефть и воду. Из-за больших объемов воды, необходимых для осуществления таких процессов, разработка обратных циркуляционных систем становится насущной необходимостью для новых нефтеперегонных заводов.

### 56.3.5 *Производство метанола*

КПД установок по производству метанола из древесины или природного газа составляет приблизительно 60 %. Таким образом значительная часть тепла, содержащегося в богатых углеродом естественных природных образованиях, должна быть удалена в процессе превращения их в метанол. Приблизительно половина всех потерь тепла может быть удалена за счет испарения с охладителей, которые испаряют

приблизительно 3 м<sup>3</sup> воды на каждую тонну выработанного метанола. Если используется прямое охлаждение и разрешено повышение температуры на 10 °C, тогда 170 м<sup>3</sup> воды будут проходить через теплообменник для удаления этого тепла, обусловив потери на испарение в размере 1,5 м<sup>3</sup>·т<sup>-1</sup> продукции. Очевидно, если вода в дефиците или дорого стоит, проектировщик должен выбирать водосберегающий метод для удаления тепла.

Гораздо большим при производстве метанола является поток охлаждаемой воды. Степень загрязнения охлаждаемой воды при этих процессах минимальная, и главной проблемой при сбросе сточных вод является тепловое загрязнение водоприемников.

### Список литературы

1. World Commission on Environment and Development, 1987: *Our Common Future*. Oxford University Press.
2. World Meteorological Organization, 1981: *Meteorological and Hydrological Aspects of Siting and Operation of Nuclear Power Plants*. Volume II — Hydrological Aspects, Technical Note No. 170, WMO-No. 550, Geneva.
3. International Atomic Energy Agency, 1980: *Ultimate Heat Sink and Its Directly Associated Heat Transport Systems in Nuclear Power Plants: A Safety Guide*. Safety Series No. 50-S6-D6, Vienna.
4. International Atomic Energy Agency, 1981: *Determination of Design Basis Floods for Nuclear Power Plants on River Sites: A Safety Guide*. Safety Series No. 50SG-S1OA, Vienna.



## ГЛАВА 57

### СУДОХОДСТВО И РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО РУСЛА

#### 57.1        **Применение гидрологии для судоходства**

Внутреннее судоходство — одна из форм использования воды. На ранних стадиях развития судоходства транспортные средства были предназначены для использования на реках или их участках. Позже возросшие требования к перевозкам и необходимость устранения дорогостоящих перевалок грузов привели к созданию более однородных условий для навигации на многих участках главных рек посредством строительства каналов и регулирования речного стока.

На ранних стадиях судоходства глубина и ширина фарватера рассматривались в качестве его основных параметров. Позднее число параметров, принимаемых в расчет, увеличилось, и более распространенными стали взаимосвязи между обводами судов и формой фарватера.

Некоторые из факторов, которые влияют на судоходство, главным образом те, которые в основном характеризуют фарватер, более или менее постоянны во времени и могут хорошо определяться на основании более или менее постоянных измерений. Другие факторы характеризуют временные условия судоходства, которые зависят от режима речного стока. Эти две группы факторов будут рассмотрены отдельно.

Существуют два основных аспекта речного судоходства, в которых гидрологии принадлежит ключевая роль:

- a) определение участков рек, которые могут постоянно использоваться для плавания судов тех или иных типов;
- b) описание текущих гидрологических условий, которые определяют условия эксплуатации судов.

Эти два аспекта рассматриваются в следующих разделах.

#### 57.1.1        **Применение гидрологических данных для характеристики фарватера**

Целью изучения любого фарватера, с точки зрения возможностей его использования для судоходства, является определение сезонных условий судоходства для различных категорий судов применительно к отдельным участкам фарватера. Это может быть выполнено посредством использования системы понятий,

которые основаны на качественных характеристиках значений отдельных гидрографических и гидрологических показателей. Такая система понятий была предложена Европейской экономической комиссией ООН. Определения некоторых из этих понятий даны ниже:

*Фарватер* — часть реки, пригодная для плавания отдельных судов и их караванов, ограниченная навигационными знаками (бакены) (рисунок 57.1);

*Судоходный габарит* — совокупность факторов, характеризующих глубину, ширину, высоту и извилистость фарватера, требующихся для регулярного и безопасного плавания судов данного водоизмещения;

*Минимальная глубина фарватера ( $h$ )* — минимальная глубина при низком судоходном уровне, которая обеспечивает требуемую ширину фарватера;

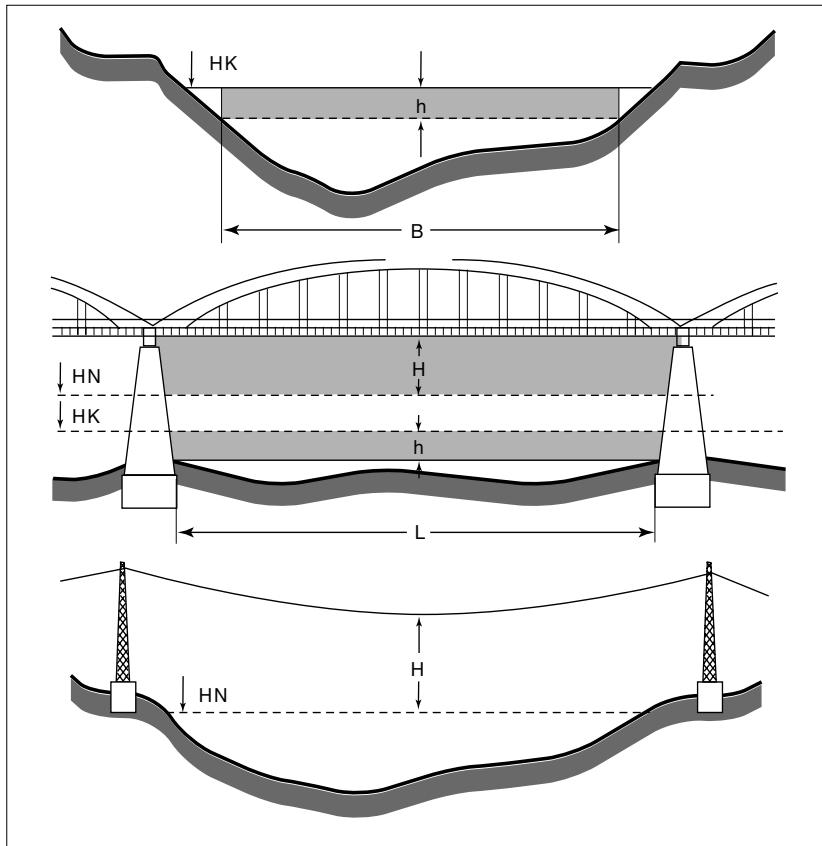


Рисунок 57.1 — Геометрические элементы фарватера

*Минимальная ширина фарватера (B)* — минимальная ширина при низком судоходном уровне, которая обеспечивает требуемую глубину фарватера;

*Предписанный вертикальный габарит (H)* — минимальное вертикальное расстояние по ширине фарватера между нижним краем любого сооружения (например моста) и высоким судоходным уровнем;

*Минимальный радиус извилистости (R)* — предписанный нижний предел радиуса извилистости речного русла, измеренный по оси фарватера в период низкого судоходного уровня;

*Низкий судоходный уровень (НК)* — критический для судоходства уровень, обеспечивающий предписанные значения глубины и ширины русла;

*Высокий судоходный уровень (HN)* — критический для судоходства уровень, обычно обеспечивающий плавание судов заданного водоизмещения;

*Навигационный расход* — расход воды, требующийся для обеспечения глубины, необходимой для безаварийной навигации;

*Минимальный навигационный расход* — расход воды, обеспечивающий низкий судоходный уровень в данном поперечном сечении;

*Максимальный навигационный расход* — расход воды, обеспечивающий высокий судоходный уровень в данном поперечном сечении реки;

*Навигационный сезон* — часть года, в течение которой судоходство не прерывается из-за ледовых явлений;

*Брод* — участок реки с малой глубиной между двумя берегами, предназначенный для перехода через реку;

*Верхний брод* — самый мелкий брод на данном судоходном участке реки.

Способы определения этих показателей рассмотрены в следующих разделах.

#### 57.1.1.1 Геометрические показатели

Для определения судоходных глубины и ширины абсолютно необходимо иметь данные о сериях поперечных сечений вдоль реки, близко расположенных друг к другу. Минимальный уровень, при котором обеспечивается судоходная ширина, должен быть определен для каждого поперечного сечения. Низкий судоходный уровень для каждого поперечного сечения определяется прибавлением значения минимальной судоходной глубины (предписанной для данной реки) к минимальному уровню реки. Радиус извилистости должен быть определен графически по контурной карте соответствующего масштаба и точности.

В случае изучения пригодности реки для судоходства целесообразно проводить это исследование для нескольких значений минимальной судоходной ширины, чтобы пригодность реки для плавания судов определенной категории могла быть точно определена.

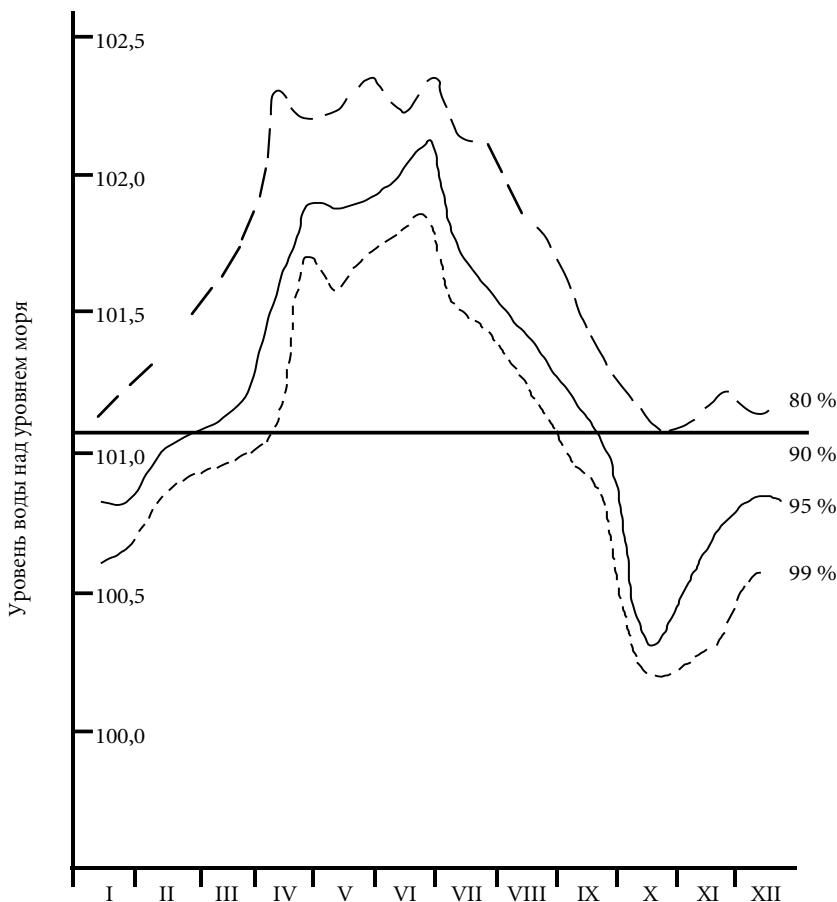


Рисунок 57.2 — Средние гидрографы стока в створе, расположенном на 1695-м километре р. Дунай

#### 57.1.1.2 Гидрологические показатели

Для определения фазы гидрологического режима, при котором речной сток обеспечивает низкий судоходный уровень, требуется гидрографы стока, а также кривые продолжительности стояния уровней (или расходов).

Гидрографы стока должны быть определены по рядам ежедневных значений минимальной продолжительностью в 50 лет. Гидрографы должны быть рассчитаны

для различных вероятностей превышения (рисунок 57.2). Периоды, в течение которых предписанная минимальная глубина фарватера ожидается с заданной вероятностью, могут быть определены путем наложения линии низкого судоходного уровня на эти кривые. Продолжительности этих периодов могут быть получены посредством расчета значений этих продолжительностей и/или

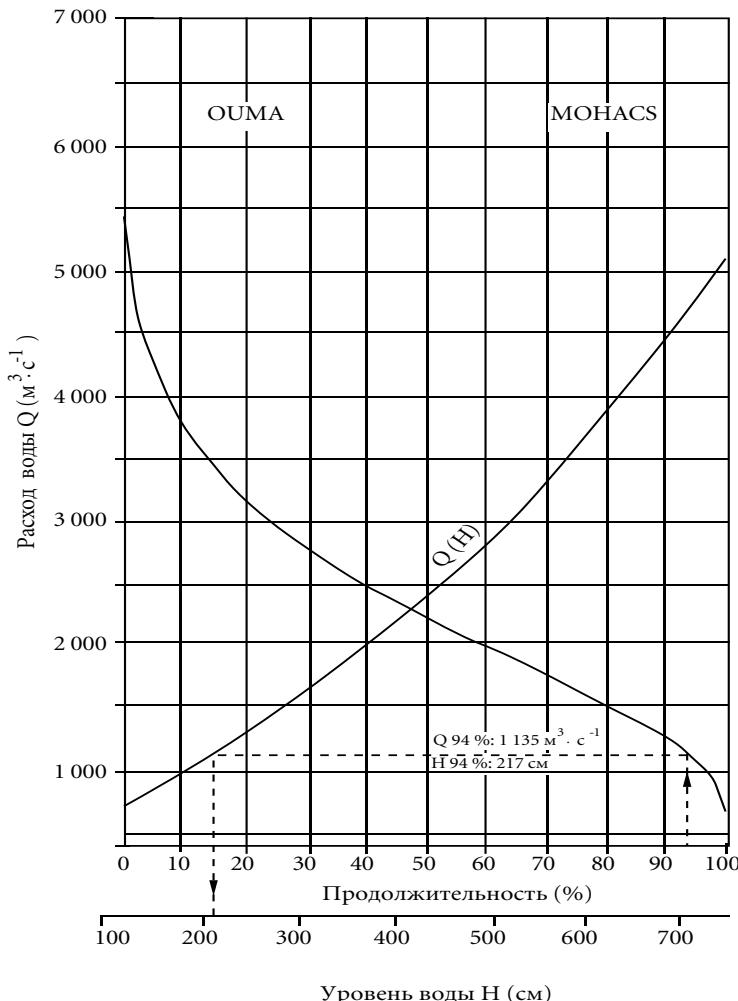


Рисунок 57.3 — Определение судоходного уровня и расхода воды заданной продолжительности

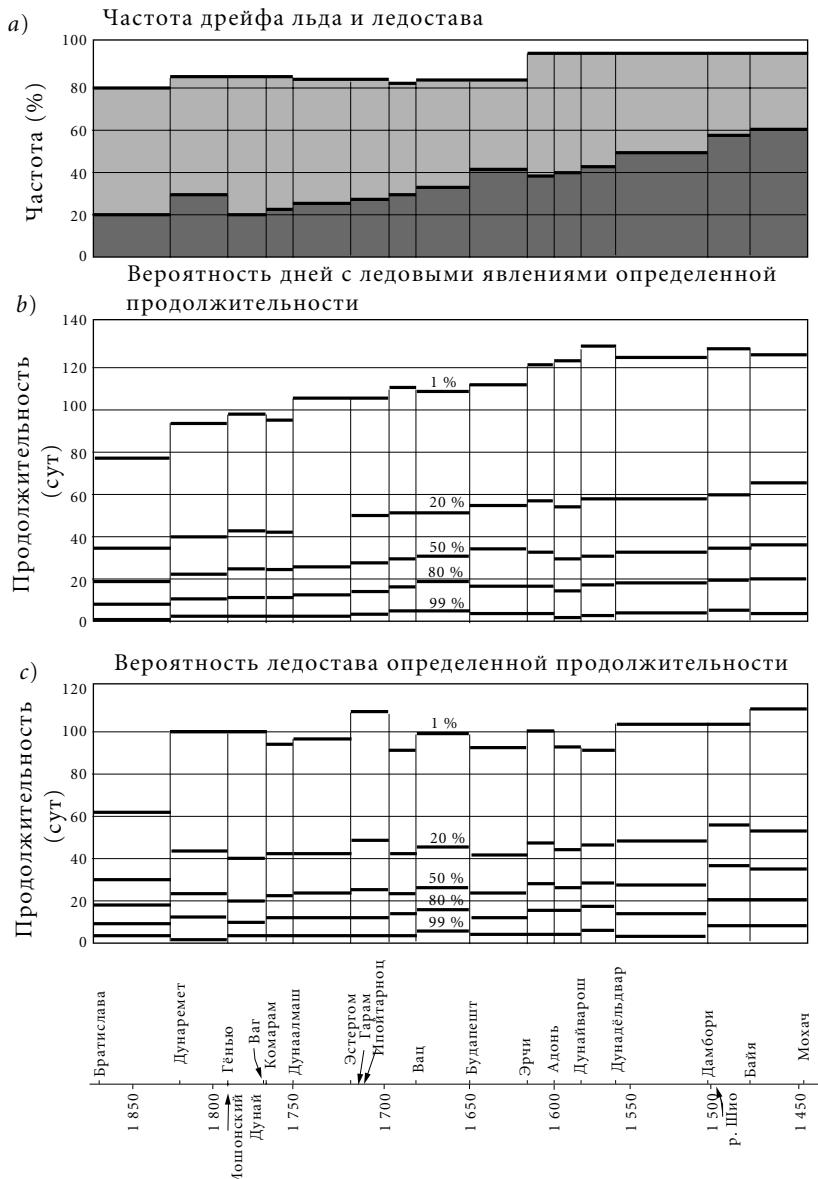


Рисунок 57.4 — Ледовые условия на венгерском участке р. Дунай

вероятностей. Так как однородность данных об уровнях не всегда гарантируется, то сначала должны быть определены продолжительности стояния расходов воды, после чего они должны быть преобразованы в кривые продолжительности уровней с использованием зависимости уровень—расход (раздел 12.5). Можно найти минимальную продолжительность стояния низкого судоходного уровня для данного участка реки посредством сопоставления низкого судоходного уровня с гидрографами стока в различных поперечных сечениях. Например, в соответствии с исследованиями, проведенными для реки Дунай, низкий судоходный уровень соответствует уровню воды 95 %-й продолжительности, рассчитанному по рядам уровневых данных за безледоставный период (рисунок 57.3).

В умеренной и арктической климатических зонах продолжительность навигационного сезона определяется, главным образом, ледовым режимом рек. На основе данных наблюдений за различными ледовыми явлениями, т. е.: ледоходом, замерзанием, разрушением льда и ледоставом (раздел 14.2) — могут быть рассчитаны значения этих явлений с заданной вероятностью, и может быть оценена продолжительность периода, не пригодного для навигации из-за ледовых явлений. Результаты такого расчета для венгерского участка реки Дунай представлены на рисунке 57.4.

С точки зрения оценки эффективности эксплуатации ледоколов обработка и анализ данных наблюдений за толщиной льда также имеют большую важность.

#### 57.1.1.3 Гидравлические показатели

Изучение режима стока, как было отмечено в предшествующей главе, может быть выполнено только для отдельных поперечных сечений. Необходимо, чтобы низкий и высокий судоходные уровни, определенные для этих поперечных сечений, были перенесены на участки реки между этими сечениями. Наиболее надежным методом интерполяции, особенно для случаев низкого судоходного уровня, является составление продольных профилей хода уровня, которое требует знания гидравлических параметров, соответствующих уклонов и шероховатостей на различных участках реки между поперечными сечениями (глава 34).

#### 57.1.2 Применение гидрологических данных для обслуживания судоходства

Внутреннее судоходство является сложной отраслью народного хозяйства, которая в значительной степени зависит от природных факторов. Без надежных знаний о состоянии русла реки, речном стоке, ледовом режиме и об их ожидаемых изменениях, планирование и осуществление судоходства будут серьезно затруднено. Для того чтобы обеспечить получение такой информации, необходим постоянный сбор данных о гидрологическом режиме, прогнозирование ожидаемых его изменений, а также регулярная передача как самих данных, так и прогнозов потребителям.

### 57.1.2.1 Сбор данных

Для обеспечения судоходства используется широкий круг данных, получаемых гидрологическими службами. Они включают:

- a) данные, относящиеся к речному бассейну, например данные о дожде и снеге;
- b) данные, собранные в створах измерений, например: уровни, расходы, температура воды, температура воздуха, пробы взвешенных и донных наносов, а также ледовые явления;
- c) данные, собранные для участков реки, такие, как глубины бродов, направления и скорости течения, профили водной поверхности и ледовые явления.

Для получения большинства данных, необходимых для обеспечения судоходства, применяются стандартные методы наблюдений (часть В). Некоторые отличия имеют место в основном при наблюдениях и измерениях, проводимых на участках реки между измерительными створами.

Измерения глубины брода должны проводиться многократно всякий раз, когда уровень воды над бродом не достигает заданного значения. Глубины должны измеряться вдоль гребня брода. В результате этих измерений определяется ширина фарватера на мелководном участке реки. Протяженность участка реки, на котором глубина воды меньше минимальной навигационной глубины, должна быть точно определена.

Для того чтобы обеспечить караванам судов возможность надежного маневрирования, требуются также измерения направлений и скоростей течений на мелководных участках реки так же, как и вблизи шлюзов. Поверхностные скорости течения измеряются с помощью поплавков, в то время как направления и скорости течений на различных глубинах измеряются гидрометрическими вертушками, снабженными указателями направления течения.

Стандартные наблюдения за характеристиками ледового режима, выполняемые вручную вдоль измерительных створов, во многом не удовлетворяют требованиям судоходства. Чтобы их удовлетворить, наблюдения должны быть расширены как с точки зрения количества измерительных створов, так и состава показателей ледового режима, которые должны измеряться. Так, между измерительными станциями стандартной сети через каждые 5–10 километров должны быть оборудованы дополнительные измерительные пункты. Самой важной задачей является организация регулярных наблюдений на участках реки, особенно за заторами и зажорами. В периоды дрейфа льда и во время его образования и разрушения наблюдения должны проводиться ежедневно, в то время как в период ледостава и неизменной водности реки наблюдения могут проводиться каждые 5–10 дней. Надежность наземных наблюдений может быть

существенно повышенена посредством проведения аэросъемок и фотосъемок. Рекомендуется каждые 5–10 дней составлять карты ледовых явлений.

Для составления ледовых прогнозов в целях судоходства совершенно необходимо вести наблюдения за первыми ледовыми образованиями, а затем за развитием припайного льда. Там, где гидравлические условия способствуют образованию внутриводного льда, его плотность в вертикальной колонке должна определяться в соответствии со следующими тремя градациями: 0–33 %, 34–67 % и 68–100 % глубины реки. Плотность дрейфующего льда характеризуется в соответствии со следующими градациями — 11–20 %, ..., 91–100 % покрытия поверхности реки.

#### 57.1.2.2 *Прогнозирование*

Эффективность и безопасность внутреннего судоходства зависит от надежности гидрологических прогнозов уровней воды, ледовых явлений и глубин воды на бродах. Эти данные необходимы как для кратко-, так и для долгосрочных прогнозов. Для судоходства особо важными являются прогнозы с заблаговременностью, равной времени добегания воды на судоходных участках рек.

Помимо основных видов гидрологических прогнозов (часть Е), в судоходстве часто используются месячные прогнозы (составленные с учетом объема воды, содержащейся в речной сети). Так как судоходство особенно чувствительно к надежности прогнозов уровня воды в меженные периоды, доверительные границы прогнозов должны быть узкими. Например, для реки Дунай применяются следующие доверительные границы:

<i>Продолжительность стояния уровня воды</i>	<i>Размах доверительной границы</i>
60 – 70 %	50 см
70 – 80 %	40 см
80 – 100 %	30 см

#### 57.1.2.3 *Передача данных и прогнозов*

Данные, собранные для судоходной реки, и прогнозы, основанные на этих данных, могут быть использованы только в том случае, если они своевременно дойдут до судоходных компаний и капитанов. Для того чтобы обеспечить эту своевременность, совершенно необходима хорошо организованная система сбора и передачи информации. Такая система особенно важна для межгосударственных рек, подобных реке Дунай, которая пересекает восемь стран. В соответствии с рекомендациями Дунайской комиссии, данные, собираемые в бассейне Дуная, ежедневно передаются по телексной связи. С целью исключения ошибок для передачи данных были приняты коды HYDRA и HYFOR (раздел 4.4). Сообщения передаются капитанам отчасти по радио и отчасти в виде ежедневных гидрологических бюллетеней.

### 57.1.3 *Судоходство на озерах и каналах*

Могут быть отмечены следующие отличия судоходства на озерах и каналах от рассмотренного выше речного судоходства:

- a) меньшая значимость информации о геометрической форме русла и гидрологическом режиме для обеспечения судоходных условий, поскольку эффект регулирования стока обеспечивает стабильность этих показателей;
- b) ледостав на озерах и водохранилищах — более продолжительный и, следовательно, навигационный период — более короткий;
- c) несмотря на то что проблемы, связанные с бродами, здесь малозначимы или полностью устранены, могут возникать другие проблемы, связанные с процессом заиления у головных сооружений шлюзов и портовых сооружений;
- d) увеличивается влияние ветрового воздействия в случае судоходства на озерах и водохранилищах;
- e) существует тесная зависимость судоходства от правил эксплуатации шлюзов и других сооружений.

Для обеспечения безопасности судоходства на озерах и каналах необходимо расширить состав наблюдений:

- a) на берегах озер и речных водохранилищ должны действовать пункты наблюдений за ветровым режимом;
- b) должны быть организованы систематические измерения количества поступающих в водохранилище и сбрасываемых в нижний бьеф наносов с целью изучения заиления водохранилища;
- c) должны проводиться регулярные наблюдения за внутриводным льдом вблизи барражей, где существуют благоприятные условия для его образования;
- d) автоматические самописцы уровня должны устанавливаться в тех створах, которые по характеру уровенного режима особенно неблагоприятны для судоходства, а также на любых участках, уровенный режим которых находится под влиянием пиковых нагрузок на ГЭС.

Для пользы дела эти данные должны дойти до капитана своевременно.

### 57.2 *Применение гидрологических данных для русловыхправительных работ*

Русловыеправительные работы носят постоянный характер и направлены на формирование русла реки для облегчения судоходства, защиты берегов и регулирования паводков. Реки в естественном состоянии часто меняют свои русла, тем самым препятствуя как судоходству, так и пропуску льда и паводков. Русловыеправительные работы помогают реке в создании своего собственного русла с достаточно устойчивыми геометрическими и гидравлическими характеристиками.

Целью незначительного выправления русла является обеспечение судоходства и пропуска льда во время меженных периодов. Такое выправление направлено на создание однородного речного русла при низком стоке, препятствующего

накоплению наносов. Противопаводочное выпрямление русла имеет по существу ту же цель, что и регулирование паводков, т. е. снижение паводочных расходов воды без значительных материальных ущербов или потери жизни.

Кроме гидрологических данных, большое число других физических, географических, морфологических, метеорологических и гидравлических данных и/или зависимостей требуется для проектирования русловых правильных мероприятий. Так как в рамках настоящего *Руководства* не предусматривается детальное рассмотрение всех этих переменных, будут рассмотрены только те из них, которые имеют отношение к практической гидрологии.

#### 57.2.1 *Эволюция и характерные черты речных излучин*

Естественные водотоки в основном отличаются неправильной формой русел, которые отклоняются то в одну, то в другую сторону в пределах их пойм. Это явление объясняется тем фактором, что каждая река является природной системой, стремящейся к динамическому равновесию, в которой один из компонентов, определяющих изменения в системе, — формирование речных излучин или меандров.

Было предложено значительное число теорий для объяснения физических причин меандрирования. Несмотря на различия, большинство из них основаны на следующих основных положениях:

- a) одним из компонентов меандрирования является движение наносов;
- b) естественные водотоки стремятся достичь состояния динамического равновесия;
- c) характер меандрирования, степень развития излучин и частота их появления различаются в зависимости от рек.

Начальная задача выправительных работ — найти оптимальное положение русла, которое свойственно природе данной реки, т. е. выбрать положение излучин, при котором можно ожидать нового динамического равновесия речной системы. Для того чтобы это стало возможным, совершенно необходимо изучить естественные излучины.

Степень извилистости речных излучин может быть охарактеризована наиболее легко с помощью круговой дуги (рисунок 57.5). Для этого должны быть определены следующие параметры:

$L$  — длина пути, измеренная по центральной линии, между двумя точками перегиба;

$H$  — длина хорды излучины;

$A$  — амплитуда излучины;

$R$  — извилистость или радиус излучины;

$\alpha$  — центральный угол речной излучины.

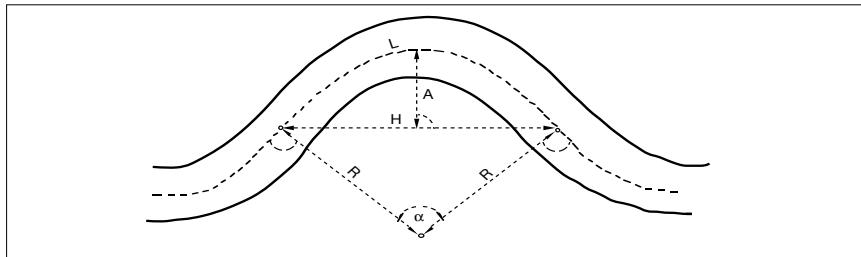


Рисунок 57.5 —Схема определения параметров речных излучин

В зависимости от фазы развития, речная излучина может представлять собой (рисунок 57.6):

- правильный участок русла;
- неправильную излучину, когда прямая линия, соединяющая две соседние точки перегиба, не пересекает выпуклую линию берега, а остается между двумя береговыми линиями;
- правильную излучину, которая, в свою очередь, может представлять собой:
  - слаборазвитую излучину, если в каждом из двух соседних поперечных сечений русла в точках перегиба есть, по крайней мере, одна точка, из которой видно другое поперечное сечение;
  - развитую излучину, если  $1,2H < L < 1,4H$  и  $\alpha < 120^\circ$ ;
  - сильно развитую излучину, если  $1,5H < L < 3,5H$ ;
  - зрелую излучину, если  $L > 3,5H$ ;
  - разорванную излучину, если расстояние между противоположными излучинами — меньше, чем ширина речного русла.

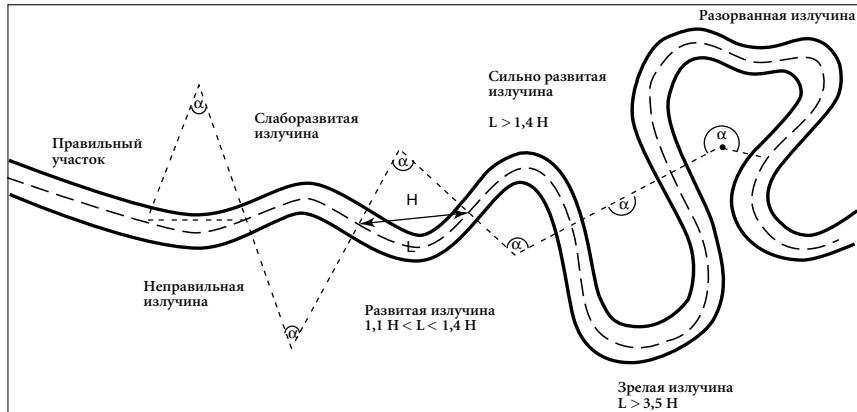


Рисунок 57.6 — Различные стадии развития речных излучин

Характеристики извилистости русла на рисунке 57.5 могут быть представлены на графике в виде продольного профиля или исследованы как случайные переменные статистическими методами.

Геометрическими характеристиками речного русла являются:

- a) площадь поперечного сечения ( $F$ );
- b) ширина поперечного сечения ( $B$ );
- c) смоченный периметр ( $P$ );
- d) гидравлический радиус ( $R = F/P$ );
- e) средняя глубина ( $h_k = F/B$ ).

Геометрические характеристики речного русла изменяются как во времени, так и вдоль реки. На основании регулярных русловых съемок геометрические характеристики могут быть исследованы либо как функции уровня воды, либо достаточно часто с помощью различных переменных, рассчитанных для разных участков реки. На рисунке 57.7 представлен пример, показывающий изменение ширины поперечного сечения вдоль реки Дунай, ниже Будапешта.

На основе таких данных может быть выбрано поперечное сечение, которое наилучшим образом соответствует естественным условиям развития данного участка, а его размеры могут быть определены с использованием гидравлических методов.

#### 57.2.2      *Определение расчетных расходов и уровней*

##### 57.2.2.1    *Определение расчетного расхода для противопаводочного управления русла*

Данные характерного паводка могут быть определены, а паводочные расходы различной обеспеченности рассчитаны при использовании методов, описанных в главах 27 и 36. Результаты этих расчетов являются основой, необходимой для выбора расчетного расхода противопаводочного русла.

В текущей практике расчетный расход дается как значение максимального годового расхода за безледоставный период заданной вероятности, превышения или заданной продолжительности. Выбор вероятности превышения зависит от демографических и экономических условий территории, которая должна быть защищена от паводков.

##### 57.2.2.2    *Определение расчетного расхода для управления русел среднего размера*

Размеры среднего русла тесно связаны с режимом речного стока и стока наносов. Оба этих процесса, а следовательно и процесс эволюции речного русла, меняются во времени. Задача состоит в определении руслоформирующего (или расчетного) расхода воды, который приведет к наибольшим изменениям естественных и/или запланированных размеров речного русла.

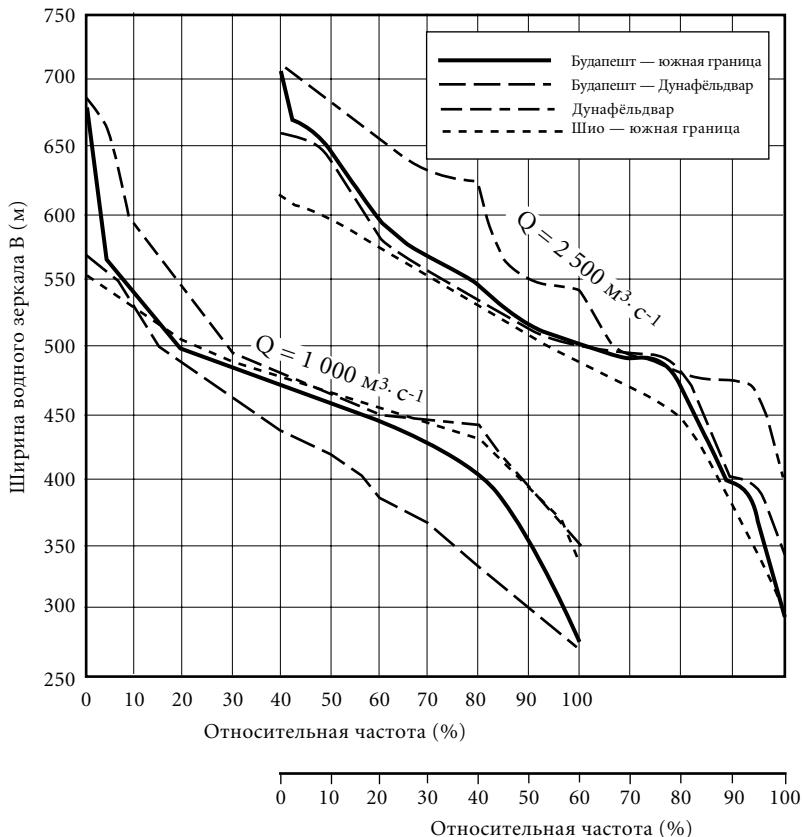


Рисунок 57.7 — Относительная частота ширин поперечных сечений на р. Дунай

Каждый геометрический параметр речного русла меняется различным образом в зависимости от продолжительности различных расходов. Таким образом, если один расход будет определяющим в отношении ширины русла среднего водотока, то другой расход будет определяющим в отношении глубины русла. Для каждого геометрического параметра значение расчетного расхода может быть найдено, исходя из условия наибольшего влияния, которое он оказывает на данный параметр, но, конечно, не существует единственного руслоформирующего расхода, который бы в равной мере воздействовал на все переменные речного русла.

Поскольку режим наносов играет важную роль в формировании речного русла, характеристики движения наносов также должны быть рассмотрены. В

качестве примера было выполнено совместное рассмотрение характеристик режима речного стока и стока наносов в связи с руслоуправительными работами на реке Нигер. Формула для определения уровня воды, соответствующего руслоформирующему расходу, имела следующий вид:

$$h_o = \frac{\int_{T} h_i G_i dt}{\int_{T} G dt}. \quad (57.1)$$

Другой метод определения расчетного расхода  $Q_D$ , применяемый либо в виде графического, либо численного решения, заключается в следующем. На вертикальной оси ортогональной системы координат откладываются значения уровней воды  $H$  (м) а, на горизонтальной оси откладываются значения четырех различных характеристик: частоты состояния уровня  $f(H)$  ( $\text{м}^{-1}$ ), расхода воды ( $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ), средней скорости течения ( $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) и произведения  $P = \Delta f \cdot Q \cdot v \cdot (\text{м}^4 \cdot \text{с}^{-2})$ . В принятой системе координат кривые, представляющие зависимости  $Q(H)$ ,  $v(H)$  и  $f(H)$ , были нанесены первыми. В то время как кривые зависимостей  $Q(H)$  и  $v(H)$  являются обычно вогнутыми, как видно из рисунка 57.8, кривая  $f(H)$  является более или менее асимметричной в виде гистограммы или колоколообразной, основой которой является вертикальная ось  $H$ , а площадь, заключенная между кривой  $f(H)$  и осью  $H$ , — единичной площадью. Ось  $H$  затем разбивается в пределах между минимальным и максимальным зарегистрированными уровнями воды на достаточное число равных интервалов  $\Delta H$  (м). Для среднего уровня  $H_i$  в каждом интервале  $\Delta H_i$  с соответствующими кривых снимаются значения  $Q_i = Q(H_i)$  ( $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ),  $v_i = v(H_i) \cdot (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})$  и  $f_i = f(H_i) \cdot (\text{м}^{-1})$  и рассчитывается произведение  $\Delta f_i = \Delta H_i f_i$ . В заключение, для каждого уровня  $H_i$  рассчитывается произведение  $P_i = Q_i v_i \Delta f_i$  ( $\text{м}^4 \cdot \text{с}^{-2}$ ), которое пропорционально кинетической энергии движущейся воды. Расположение результирующего значения  $P_D$ , параллельное (по горизонтали) направлению линии  $P_i$ ,

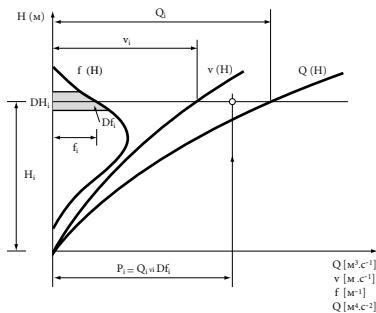


Рисунок 57.8 — Графический метод для определения расчетного расхода

определяется посредством использования графического метода веревочного многоугольника «силы» или (численного) решения уравнения кинетической энергии. Оба эти метода хорошо известны в статистике. По значению уровня  $H_D$ , соответствующего полученному значению «силы»  $P_D$ , может быть получено требуемое значение расчетного расхода  $Q_D = Q(H_D)$  по кривой  $Q(H)$ . Результаты, полученные таким образом, должны быть проверены на участках реки, которые считаются устойчивыми.

## ГЛАВА 58

### УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

#### 58.1       **Общие положения**

Когда водоток протекает через урбанизированную территорию, важно попытаться определить его происхождение и источник формирования качества воды для выбора соответствующей стратегии проектирования, реконструкции (восстановления), сохранения систем ливневого дренажа и управления ими, что в значительной степени зависит от этих сведений. Источником воды на урбанизированной территории может быть:

- a) сток с вышерасположенных территорий;
- b) сток с прилегающих территорий;
- c) грунтовый (базисный) сток;
- d) сток от осадков, выпадающих над рассматриваемой территорией;
- e) приливы и нагоны;
- f) вода, использованная на различные цели (санитарные, промышленные воды и т. д.).

Паводки, вызванные стоком воды с естественных территорий и сельской местности, а также подземными водами, рассмотрены в других главах. В данной главе рассматривается только поверхностный сток, обусловленный местными дождевыми осадками и его взаимодействием с водоприемником.

Городское и промышленное водоснабжение и управление водным хозяйством связаны с городским дренажем как с источником загрязненных (санитарных и промышленных) сточных вод. Постоянные наблюдения должны быть установлены за суточными изменениями количества и качества сточных вод от этих источников, так как они служат в качестве входной информации при:

- a) проектировании дренажной системы, её сохранении и восстановлении;
- b) проектировании и управлении очистными сооружениями;
- c) оценке влияния загрязненных (и очищенных) вод на принимающие их водные объекты.

Мониторинг и управление подземными водами на урбанизированных территориях очень специфичны из-за разнообразия способов, с помощью которых человек воздействует на их баланс и качество. Подземные воды часто являются основным

источником питьевой воды на урбанизированных территориях. Однако расход подземных вод на урбанизированных территориях обычно более низкий, чем поверхностных вод, из-за возрастающей процентной доли непроницаемых площадей, которые обусловливают более низкие скорости инфильтрации и более быстрый поверхностный сток. С другой стороны, подземные воды на урбанизированных территориях подвержены загрязнению как от точечных, так и от рассеянных источников.

Поэтому целями объединенного управления водным хозяйством на урбанизированных территориях могут быть:

- a) обеспечение соответствующего количества и качества питьевой и промышленной воды при оптимальных экономических условиях и с минимальным неблагоприятным воздействием на окружающую среду;
- b) минимизация загрязнения и неблагоприятных изменений уровней подземных вод;
- c) снижение расходов, связанных с затоплением, и ущерба, вызванного ливнями, путем создания соответствующего ливневого дренажа, основанного на сочетании улучшенной дренажной сети и регулирования стока в реальном масштабе времени с помощью вспомогательных сооружений (накопительные и сбросные емкости, насосные станции и т. д.);
- d) снижение неблагоприятных воздействий очищенных или неочищенных городских вод (санитарных, промышленных и ливневых) на водоприемники.

Так как городской ливневый дренаж представляет собой объект, сильно подверженный метеорологическим воздействиям, он будет рассмотрен более детально.

## 58.2 Городской ливневый дренаж

Городские территории подвержены воздействию ливней, которые имеют стохастическую природу, поэтому проектирование дренажных систем основано на рассмотрении ливней определенного периода повторяемости. Слой дождевых осадков определенного периода повторяемости обычно определяется по кривым интенсивность осадков—продолжительность, которые составлены для многих городов. Хотя в обычной практике применяется двухлетний период повторяемости ливня как исходной величины для анализа осадки—сток, иногда принимаются и другие периоды повторяемости в зависимости от значимости территории, которая должна быть защищена и от величины возможных ущербов, которые могут быть вызваны паводками.

В самых современных моделях, применяемых при проектировании ливневого дренажа, используются либо фактические ряды наблюдений за ливнями, либо смоделированные ряды в качестве входа в модель. Интенсивность дождевых осадков обычно выражается как функция времени.

Городские дренажные бассейны отличаются от естественных водосборов во многих отношениях. Некоторые из этих отличий — следующие:

- a) виды землепользования отличаются и обычно более надежно определяются, чем в отношении природных водосборов;
- b) процент непроницаемых поверхностей выше;
- c) если не применяются специальные методы для снижения стока [1, 2], паводки образуются быстро с высокими максимумами;
- d) вода дренируется с городской территории посредством сочетания поверхностных коллекторов и подземных дренажных систем;
- e) дренируемые площади обычно небольшие, но в больших городских районах они более крупные, со сложными системами заглубленных трубопроводов, насосных станций, а в последние годы и больших подземных хранилищ.

В течение 1970-х и 1980-х годов существовали важные программы по методам измерения дождевых осадков и стока [3], которые позволили разработать и осуществить калибрацию комплексных, часто физически обоснованных моделей, для анализа дождевых осадков и стока и проектирования системы ливневого дренажа [4]. Несмотря на то что дренажные системы обычно спроектированы для обеспечения паводков, вызываемых ливнями определенной вероятности превышения, большинство современных моделей позволяют моделировать последствия коллекторного стока, объединенного с поверхностным стоком по улицам (сток по открытым каналам).

### **58.3 Моделирование дождевых осадков, стока и систем ливневого дренажа**

Хотя простые классические модели, например: рациональная формула, методы времени—площадь и единичного гидрографа — до сих пор еще используются, в большинстве перспективных систем используются более комплексные детерминированные подходы. Основываясь на проверенных данных, заимствованных из банка данных моделей городского дренажа [4], для большинства случаев поверхностного стекания воды достаточно применения преобразованных уравнений кинематической волны (законы сохранения массы и энергии). Некоторые приближения достаточны для расчета стока по сточным канавам. Обычно хорошее совпадение между смоделированным и измеренным стоком может быть достигнуто, если применена надлежащая калибровка параметров модели [5].

В комплексных системах городского дренажа больших городов подобные модели являются только одним компонентом современных систем защиты от паводков, которые состоят из нескольких модулей (видов действий):

- a) прогнозы в реальном масштабе времени, основанные на данных радиолокационных измерений и осадкометров;

- b) применение компьютеризированных баз данных (дренажная сеть, землепользование, информация о состоянии сооружений и устройств регулирования и т. д.);
- c) взаимодействие с другими городскими службами для обеспечения координации и объединенного управления водными ресурсами;
- d) эффективное обучение персонала, в основе которого более высокий уровень изучения процесса обработки информации и применения систем принятия решений [6].

### Список литературы

1. Fujita, S., 1984: Experimental sewer system for the reduction of urban storm runoff (P. Balmer, P. A. Malmquist and A. Sjoberg, eds.). *Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage*, 4–8 June 1984, Gothenburg, Sweden, Vol. 3.
2. Sieker, F., 1984: Stormwater infiltration in urban areas (P. Balmer, P. A. Malmquist and A. Sjoberg, eds.). *Proceedings of the Third International Conference on Urban Storm Drainage*, 4–8 June 1984, Gothenburg, Sweden, Vol. 3.
3. Maksimovic, C. and Radojkovic, M., 1986: *Urban Drainage Catchments — Selected Worldwide Rainfall-runoff Data from Experimental Catchments*. Pergamon Press, Oxford.
4. Yen, B. C., 1986: Rainfall-runoff processes on urban catchments and its modelling (C. Maksimovic and M. Radojkovic, eds.). *Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data*, 9–11 April 1986, Dubrovnik, Yugoslavia.
5. Fuchs, L., 1990: Accuracy of rainfall-runoff models. *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Storm Drainage*, 29 July–3 August 1990, Osaka, Japan.
6. Bauwens, W., Fuchs, L. and Maksimovic, C., 1990: An educational tool for the computer-aided design and renovation of sewer systems. *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Storm Drainage*, 9 July–3 August 1990, Osaka, Japan.

## ГЛАВА 59

### ПЕРЕНОС НАНОСОВ И ДЕФОРМАЦИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

#### 59.1        **Общие положения**

Перемещение наносов водным потоком в реках и каналах является важным фактором при планировании, проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов. Перенос наносов влияет на функционирование водохранилищ, устойчивость и перемещение речных русел, проектирование сооружений, которые находятся в контакте с текущей водой, и пригодность воды для различных целей. Правильная оценка влияния переноса наносов и меры, которые могут быть необходимы для его регулирования, требуют изучения процессов размыва, переноса и отложения наносов и их взаимодействия с гидрологическими процессами на водосборе.

#### 59.2        **Эрозия на речных водосборах**

Самым существенным фактором эрозии водосборов является текущая вода. К другим факторам относятся: ветер, лед и сила тяжести. Процессы, посредством которых вода разрушает почву, сложны и зависят от: характера дождей, свойств почвы, уклона склонов, вида растительности, агротехнических приемов обработки почвы и степени урбанизированности территории. Считается, что два последних фактора являются наиболее значимыми среди факторов хозяйственной деятельности с точки зрения их влияния на эрозионные процессы.

Для определения потерь почвы за счет эрозии (поверхностная эрозия) с сельскохозяйственных полей, разработаны эмпирические уравнения. Одно из них, разработанное Масгрэйвом преимущественно для условий США[1], представлено ниже в качестве примера:

$$E = IRS^{1,35} l^{0,35} p^{1,75}, \quad (59.1)$$

где  $E$  — среднегодовые потери почвы, мм;  $I$  — показатель эрозионной устойчивости почвы, мм;  $R$  — фактор, характеризующий состояние поверхности почвы;  $S$  — уклон склона, %;  $l$  — длина склона, м;  $p$  — слой осадков 30-минутной продолжительности за двухлетний период, мм. Значения параметров  $I$  и  $R$  определяются эмпирическим путем в результате региональных исследований.

### 59.3 Русловая эрозия

Русловая эрозия обусловлена силовым воздействием сосредоточенного потока воды на речное русло. Ее масштабы зависят от гидравлических характеристик потока и устойчивости русловых отложений к эрозии. В случае несвязных отложений устойчивость их к эрозии определяется размером, формой, гидравлической крупностью частиц и уклоном дна водотока. Устойчивость к эрозии связных грунтов определяется также степенью связанности грунта. Взаимосвязи между гидравлическими переменными и параметрами, обуславливающими устойчивость русел к эрозии, не полностью понятны и часто выражаются эмпирическими формулами [1, 2]. Работы по регулированию стока и управлению русел могут оказывать существенное локальное влияние на ускорение русловой эрозии, если они вызывают увеличение глубины русла, скорости течения, изменение направления потока или снижение естественной нагрузки потока наносами. Последний фактор часто проявляется на участке реки ниже плотины, и его воздействие может распространяться на многие километры вниз по течению.

На территориях с голым почвенным покровом и бедными почвами могут развиваться овраги, увеличивающиеся в размерах, которые могут быть рассчитаны с помощью эмпирических формул, содержащих такие параметры, как площадь водосбора оврага, наклон подводящего русла, слой осадков и содержание глинистых частиц в размываемом грунте [3].

### 59.4 Перемещение наносов в каналах

#### 59.4.1 Перенос взвешенных наносов

Тонкодисперсные (взвешенные) наносы, перемещающиеся по руслу, образуются, главным образом, за счет верхнего слоя почвы водосбора и береговых отложений русел. Однако они также обязаны своим происхождением канализационным и другим возвратным водам. Например в нижнем течении р. Рейн, одна треть всего объема взвешенных наносов имеет такое происхождение. Значительная часть переносимых наносов откладывается на поймах [4], особенно выше по течению от гидротехнических сооружений. Отложившиеся наносы подвергаются уплотнению и другим физическим и химическим преобразованиям, которые иногда могут приводить к предотвращению их повторного размытия. Доля среднегодового объема транспортируемых наносов по отношению к площади водосбора обычно уменьшается с увеличением площади речного бассейна. Мутность взвешенных наносов оценивается с использованием формул, описанных в работах [2, 5]:

$$\log c_s = C \log Q + B, \quad (59.2)$$

где  $c_s$  — мутность, выраженная через вес наносов в единице объема воды;  $Q$  — расход воды;  $C$  — коэффициент размерности;  $B$  — функция слоя осадков, неразмывающегося расхода воды или других метеорологических и гидрологических переменных.

Мутность взвешенных наносов меняется по поперечному сечению реки. Она является относительно высокой в нижней части поперечного течения и может быть неоднородной в горизонтальном направлении [2]. В связи с этим для получения средних значений мутности, часто бывает необходимым отбирать пробы в нескольких точках или на нескольких вертикалях поперечного сечения реки. Средняя мутность наносов выражается через вес общего количества наносов за единицу времени, умноженному на расход воды. График зависимости мутности взвешенных наносов от времени обычно имеет пик, не совпадающий с пиком расхода воды. Эта сдвигка связана со специфическими условиями формирования стока наносов на водосборе, и до сих пор нет общего подхода к оценке этого различия.

#### 59.4.2 *Перенос донных наносов*

Груободисперсные наносы (донные отложения) движутся вдоль русла реки посредством скольжения, перекатывания и взмучивания и откладываются на дне или вблизи него. Факторами, обусловливающими перенос донных наносов, являются размер и форма частиц и гидравлические свойства потока. В результате постоянного взаимодействия гидравлических условий потока и грубообломочных отложений, на дне реки образуются различные формы, известные как плоские, рифели, гряды волнообразные и антигряды. Они оказывают сопротивление стоку воды, которое изменяется в широких пределах и принимает максимальное значение в случае формирования гряд [3, 6]. Эмпирическая формула для расчета скорости перемещения грубодисперсных наносов, предложенная Дю Бойзом в 1878 г. [1], все еще используется. Она имеет следующий вид:

$$q_s = c \frac{\tau_o}{\gamma} \left( \frac{\tau_o}{\gamma} - \frac{\tau_c}{\gamma} \right), \quad (59.3)$$

где  $\tau_o = \gamma R_h S_e$  и  $q_s$  — скорость перемещения наносов на единицу ширины русла,  $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $\tau_o$  — удельная нагрузка на дно,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$ ;  $\tau_c$  — эмпирически получаемое минимальное значение  $\tau_o$ , необходимое для перемещения рассматриваемых донных отложений;  $\gamma$  — удельный вес воды,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $c$  — коэффициент размерности,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $S_e$  — энергия текущей воды;  $R_h$  — гидравлический радиус, м, который для широких рек может быть заменен средней глубиной. Значения коэффициентов для уравнения (59.3) приведены в нижерасположенной таблице [1].

### Коэффициенты уравнения Дю Бойза

<i>Вид отложений</i>	<i>Средний диаметр частиц (мм)</i>	<i>c</i> ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ )	<i>τc</i> ( $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$ )
Тонкодисперсный песок	1/8	8 370 000	0,0792
Среднедисперсный песок	1/4	4 990 000	0,0841
Крупнодисперсный песок	1/2	2 990 000	0,1051
Очень крупный песок	1	1 780 000	0,1545
Гравий	2	1 059 000	0,251
Гравий	4	638 000	0,435

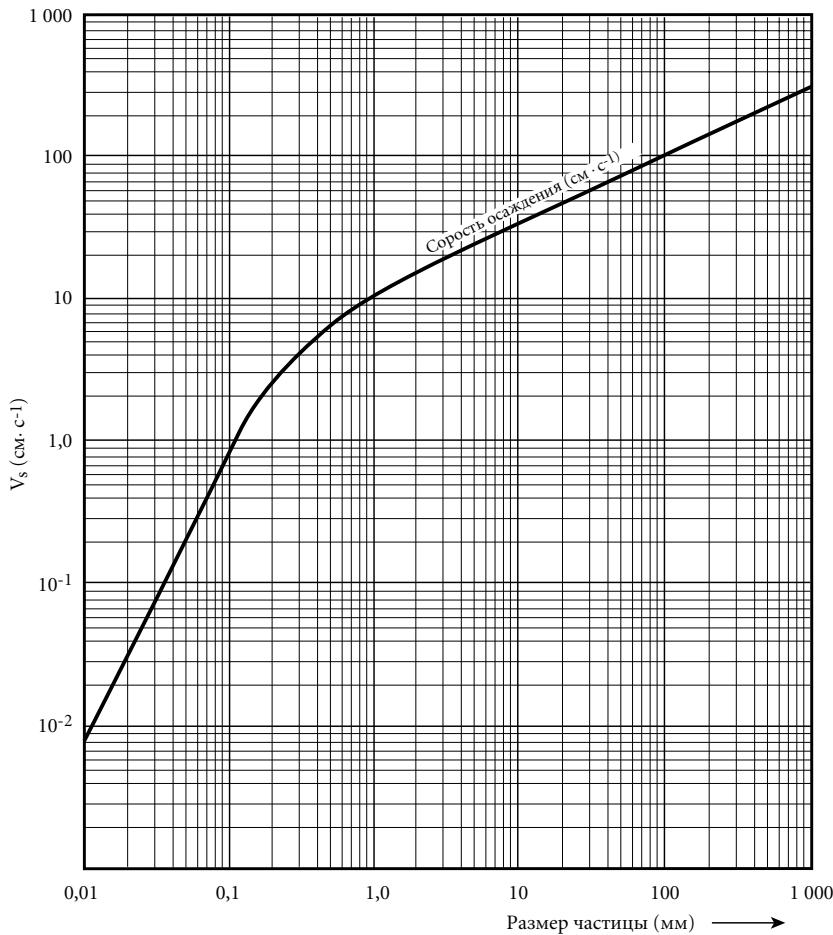
Более теоретически обоснованная формула была разработана Мейером—Питером [1]:

$$q_s = \left\{ \frac{(\gamma q)^{2/3} S_e - AD}{B} \right\}^{3/2}, \quad (59.4)$$

где  $q$  — расход воды на единицу ширины русла,  $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\gamma$  — удельный вес воды,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $S_e$  — гидравлический уклон;  $D$  — характерный размер частиц, м;  $q_s$  — расход наносов на единицу ширины русла,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $B$  — безразмерная константа, которая принимает значение  $B = 0,40$  для принятой системы единиц;  $A$  — коэффициент размерности, который имеет значение  $A = 17,0$  при использовании системы единиц  $\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ . Если перемещаемые наносы имеют другие размеры, параметр  $D$  меняется на  $D_{35}$ , который характеризует такой размер частиц, при котором 35 % донных наносов (по весу) будут перемещаться. Уравнение (59.4) дает надежные результаты, особенно для песчаных русел.

### 59.5 Отложение наносов

На устьевом участке реки вследствие уменьшения скорости течения снижается транспортирующая способность потока. Первыми отлагаются грубообломочные наносы, которые затем, взаимодействуя с русловыми формами, могут привести к появлению дополнительных меандров и протоков. Площадь водной поверхности увеличивается, глубина снижается, скорости течения уменьшаются и в конце концов даже мелкодисперсные наносы начинают отлагаться. В результате, дельты могут быть сформированы в верхней части водохранилищ или других водоприемников. Отложившийся материал позднее может быть принесен в более глубоководную часть водохранилища в результате процессов водообмена.



Скорость осаждения кварцевых частиц

Наносы отлагаются в соответствии со скоростью их осаждения. График связи между размером частиц и скоростью осаждения наносов представлен выше на рисунке [1]. Значительное количество наносов может оставаться во взвешенном состоянии в течение нескольких дней после их поступления в водохранилище. Этот процесс может мешать использованию водохранилища для определенных целей, например для водоснабжения или рекреации.

Следует подчеркнуть, что не все наносы отлагаются в водохранилище. Значительная их часть остается в русловой сети верхних частей водосбора,

выше водохранилища, а также сбрасывается в нижний бьеф гидротехнического сооружения. Эффективность заилиения водохранилища зависит от гидравлических свойств водохранилища, характера наносов и гидравлических особенностей водовыпусков. Плотность вновь отложившихся наносов относительно мала, но увеличивается с течением времени. Органические компоненты в составе наносов могут подвергаться изменениям, приводящим к уменьшению их объема и развитию биохимических процессов в водной массе водохранилища.

#### 59.6 Меры по регулированию стока наносов

Меры по регулированию стока наносов подразделяются на две большие группы:

- a) меры по преобразованию ландшафтов для защиты водосборов;
- b) меры по улучшению структуры речной сети.

Детальное описание этих мер содержится в работе [7]. Целью мер по преобразованию ландшафтов является снижение эрозии на водосборе и, как следствие этого, снижение скорости формирования наносов посредством улучшения защиты почв, снижения поверхностного стока и увеличения скорости инфильтрации. Эти меры включают в себя:

- a) улучшение растительного покрова посредством агротехнических и лесохозяйственных приемов, например использования севооборотов, и ликвидация пастбищ в районах с интенсивным стокообразованием и формированием наносов;
- b) соответствующая обработка почвы, например: сельскохозяйственное освоение склонов, развитие террасного земледелия на склонах, расчистка и спрямление естественных водотоков, орошение, а также осушение канав и других понижений рельефа.

Методы по улучшению структуры речной сети имеют обеспечение защиты от эрозии и проводятся наряду с мероприятиями по преобразованию ландшафтов. Они включают в себя: выпрямление русел и работы по повышению их устойчивости к размыву, очистку водохранилищ, родников и очагов формирования наносов, улучшение дюкеров и сбросов паводочных вод, а также отвод паводков.

#### Список литературы

1. Chow, V. T. (ed.), 1964: *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
2. National Research Council, 1973: *Proceedings of the Ninth Hydrology Symposium on Fluvial Processes and Sedimentation*, 8–9 May 1973, Edmonton, Inland Waters Directorate, Department of the Environment, Ottawa, Ontario.

3. Simons, D. B. and Richardson, E. V., 1962: The effects of bed roughness on depth-discharge relations in alluvial channels. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1498-E*.
4. Guy, H. P., 1970: *Fluvial Sediment Concepts*. Chapter C1, Book 3 of Techniques of Water Resources Investigations, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
5. Negev, M., 1972: *Suspended Sediment Discharge in Western Watersheds of Israel*. Hydrological Paper 14, Hydrological Service, Jerusalem.
6. Simons, D. B. and Richardson, E. V., 1966: Resistance to flow in alluvial channels. *U.S. Geological Survey, Professional Paper 422-j*.
7. Vanoni, V. A. (ed.), 1975: *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers, New York.



## УКАЗАТЕЛЬ

- Абляция 648, 650–651
- Автоматическая станция 325, 327, 371
- Адвекция 122, 528, 537–538, 541–549, 570
- Аллювиальный 299
- Альбедо 36, 121
- Анемометр 109, 140, 146
- Бар 207, 308
- Безвозвратное водопотребление 702, 706, 752, 761, 769, 774
- Береговое регулирование 525–526
- Бифуркационное отношение 579
- Боуэна отношение 529–530
- Вебера число 47
- Вейбулла распределение 424, 511, 525
- Взвешенные наносы 168, 187, 232, 309, 682, 798
- Влажность 1, 89–91, 121, 125, 135–136, 197–211, 264, 323, 371, 442, 445, 447, 464–465, 471–472, 478, 488–491, 556–558, 560, 564, 595, 607, 610, 616–617, 624, 628, 636–637, 642, 646, 652, 730, 753–759
- Влажность относительная 43, 146, 292, 348, 536
- Влажный год 767
- Водобор 347, 500, 517, 520–522, 569, 572, 584, 591, 672, 692, 755
- Водослив 56, 168, 169, 180–182, 186
- Водохранилище 1, 49, 60, 139, 143–144, 146, 193, 285, 296, 312, 320, 501–502, 504, 506–507, 518, 522, 525–545, 566, 572, 601, 628, 638, 643, 661–662, 678, 681, 692, 695, 709–726, 729, 732, 734–744, 768, 786
- Возвратный сток 702, 711, 766
- Волна 56, 501–502, 506, 621, 624–626, 723–726, 742–743
- Временной ряд 343, 346–347, 370, 377, 379, 396, 420, 454, 558, 622, 629, 642, 721
- Время добегания 162, 488, 491, 492, 498, 505, 625, 626, 783, 785
- Вскрытие льда 242, 350, 609, 657, 658, 659, 661, 662, 784
- Гидрогеология 589
- Гидрограф единичный 493–498, 558, 606, 625, 642, 730, 780, 793
- Гидрография 724
- Гидрометеорология 12, 446, 449
- Гидрометрическая вертушка 88, 151, 154–156, 159–160, 168–174, 222, 260, 380, 784
- Гидрометрическая станция 179, 286, 295, 297, 395
- Гидрометрия 90, 608
- Гидростатическое давление 135
- Гидротехническое сооружение 179, 334, 596, 799–800
- Глобальная циркуляция 14, 591
- Гранулометрический состав 187
- Грунтовые воды 1, 9, 18, 19, 30, 45, 69,

- 70, 88–89, 202, 211–212, 217–227, 231, 279, 285, 297–299, 309, 312, 478–479, 491, 500, 513, 572, 672, 677–678, 692, 702, 710–711, 755–757, 759, 791  
Годовой максимум 421, 422, 517, 519, 734  
Годовые ряды 422, 429, 430, 447, 517–518  
Дарси закон 40, 564  
Движущегося судна метод 92, 171–173, 175  
Дистанционное зондирование 17, 90, 196, 205  
Доверительный интервал 50–52, 58, 603–604  
Доверительный уровень 33, 58–59, 160, 175, 247  
Дождь 100–101, 107, 110–111, 114–115, 123, 213, 242, 305, 334, 427–428, 430–431, 433, 435–437, 440, 443, 461, 473, 489, 494, 497, 606, 781  
Емкость 45, 509, 556–557, 563–564, 566, 646, 652, 709, 713, 715, 721, 737–740, 761, 763, 766  
Загрязнитель 255, 308–309, 569–570  
Задержание 583, 719, 740–742  
Заливение 215, 590, 665, 786, 802  
Запас воды в снеге 125, 129, 135, 137, 292, 471, 474, 617, 653–654  
Запас подземных вод 211, 479, 589, 647  
Засоление 665, 754–755  
Засуха 9, 31, 76, 434–435, 509, 512, 672–673, 702, 719–720  
Зона насыщения 564  
Излучина 785–788  
Изогиета 440  
Индекс сухости 435  
Интегральная кривая двойная 453, 477–478  
Интеграционный метод 155–157  
Интенсивность испарения 563  
Инфильтрация 40, 48, 461, 470–471, 487, 551, 648, 651–652, 670, 712, 730, 794, 802  
Испарителя коэффициент 379, 538–540  
Испаряемость 563, 750  
Канал 60, 88, 741, 748, 751, 756, 760, 763, 777, 786, 797–798  
Капиллярность 103, 756  
Качество воды 1, 29, 68–69, 83, 211, 227–228, 231–256, 285, 296–297, 299, 301, 309, 312, 315, 320, 326, 330–334, 352–353, 358, 362, 394, 396, 404, 406, 504, 561, 568–573, 595, 681–688, 734, 752, 768, 791  
Кислотный дождь 243  
Конденсация 142, 461–472  
Контрольный створ 158–163, 165, 179–181, 183–184, 607  
Конус депрессии 212  
Корневая зона 434, 546, 562, 755–757, 759  
Коррелограмма 568  
Корреляция 125, 131, 281–282, 375, 380, 383, 452, 456, 482–484, 622–623, 625, 631, 636, 643  
Кривая обеспеченности 49, 511–512, 518–519, 599, 672, 709, 720, 766  
Кривая продолжительности 509–510, 718, 720, 767  
Лед 50, 56, 60, 97, 123, 127–128, 149, 152, 156–158, 160, 196–199, 241, 290, 295, 297, 305, 332, 350, 416, 472, 595, 607, 612, 639, 657–662, 742, 781, 784, 795  
Ливень 120, 439–449, 455, 472, 490, 493, 613–614, 638, 793  
Максимальный возможный паводок 472, 729, 730, 732–733  
Маркова цепь 643  
Маскингама метод 504–505

- Мгновенный единичный гидрограф 498  
 Мгновенный паводок 595, 604, 611, 636–638  
 Межень 18, 478, 512, 514, 706, 767, 768, 785  
 Мель 306  
 Метка высоких вод 167–168, 335, 734  
 Нагон 295, 595, 635, 640–641, 723–725, 791  
 Неразрывности уравнение 87, 166, 504  
 Обработка данных вторичная 18  
 Объем мертвый 502, 721  
 Озеро 1, 13, 18, 49, 60, 89, 124, 147–150, 195, 231, 255, 295, 302, 312, 314, 320, 379, 524–526, 533–534, 538–539, 542, 616, 694, 725, 786  
 Орошение 29, 79, 142, 301, 313, 593, 665, 703–704, 751–756, 759, 767, 802  
 Осадки 1, 16, 41–42, 60, 88, 97–124, 140, 285, 313, 339, 367, 404–405, 407, 419, 427–428, 429–433, 435–437, 439–449, 451, 455–457, 460–461, 472–473, 489, 546, 552, 556, 559, 607, 609, 610, 612, 624, 648–649, 653, 693, 711, 713–714, 745, 791–792  
 Осадкомер 97–99, 100–103, 106–108, 127, 133–134, 140, 290–291, 324, 334  
 Отложение наносов 295–296, 589–590, 678, 712, 742  
 Отлив 171–172  
 Отток 29, 48, 89, 212, 491, 507, 526, 533, 538, 555, 560, 710–716, 726, 769  
 Очищение 254, 791  
 Паводок 32, 125, 147, 166–167, 170–173, 179, 190, 279, 285–286, 291, 295, 308, 327, 334, 338, 362, 410, 444, 487, 517–522, 594–601, 611, 616, 624, 635–639, 672, 682, 707, 729–737, 786, 789, 791  
 Паводочная волна 501, 507, 609, 611, 621, 624, 640  
 Перелив 722, 742, 744  
 Перехват осадков растительностью 562, 756  
 Повторяемости период 421–422, 429–430, 432, 518–519, 522, 599, 730, 733, 793  
 Польдер 739  
 Пороги 179, 267, 581, 761  
 Потенциальное суммарное испарение 376, 391, 396, 491, 500, 545, 563  
 Предупреждение о паводке 32, 639, 668, 746  
 Пресная вода 31, 227, 675–676  
 Прилив 171–172, 183, 791, 793  
 Приток 29, 48, 89, 444, 469, 501, 506–507, 525–526, 533, 538, 560, 569, 660, 683, 709–710, 715–716, 718, 726, 769  
 Проводимость 39, 59, 164, 176, 227, 242, 244–246, 248, 301, 353, 564  
 Прогноз 2, 3, 31, 50, 60, 335, 417, 461, 503, 561, 569, 573, 593–604, 605–609, 614, 617–618, 621–624, 626, 629, 631, 635–637, 647, 650, 657, 659–660, 746, 783, 785  
 Прогнозирование паводков 150, 285, 295, 597, 608, 635–636  
 Пьеометр 312  
 Радиус влияния 43  
 Размыв 179, 797, 798, 802  
 Разрешение 54, 203, 206, 615–616  
 Растворимость 164, 241, 245–246  
 Расчетный ливень 443–444, 446–447, 733, 748  
 Регрессионный анализ 420, 455, 481–482, 521, 623, 643  
 Регулирование 32, 608, 685, 707, 739–748, 774, 777–786  
 Рейнольдса число 43

- Репер 149, 217, 286  
Репрезентативный бассейн 286  
Речной сток 1, 13, 19, 3, 125, 185, 227, 283,  
285–286, 293–294, 303, 308, 313,  
349–350, 375, 405, 425, 427, 454, 458,  
461, 469–470, 472–474, 477–484, 487–500,  
509–515, 517, 546, 554–560, 571–572,  
583, 588, 594, 596, 621–622, 631, 635,  
639–642, 647–655, 672, 678, 685,  
688–689, 729–736, 739–748, 777, 783,  
787, 791  
Роса 121–123, 348, 466  
Русло 55, 89, 151–152, 155, 158–160, 164,  
167–169, 413, 501–507, 558, 560, 602,  
605–606, 608, 685, 723, 739, 744, 779,  
786, 789  
Русловая емкость 500, 560  
Ряд годовых максимумов 421–422, 599  
Самописец 109–112, 148–150, 223–226,  
257, 291, 369–370, 379, 786  
Система сбора данных 28, 323–324, 637,  
783–785  
Сифон 110  
Сканер 91  
Скважина 1, 212–223, 228–229, 258,  
297–299, 309  
Снег 1, 44, 59–60, 97, 104, 110, 112–113,  
124–137, 196, 237, 268, 290, 292, 305,  
349, 410, 413, 461–474, 545, 594, 608,  
610, 642  
Снеготаяние 44, 97, 135, 290, 305, 350,  
413, 461–462, 464–474, 556, 594, 641  
Снежная лавина 31, 268  
Соленость 203, 227, 295, 371  
Средневзвешенное значение 654  
Стратификация 305–306, 683, 687  
Сублимация 472  
Суммарное испарение 1, 38, 139–146,  
379, 474, 487, 491–492, 545–549, 556,  
563, 616, 654, 752–753  
Тальвег 579  
Телеметрия 32, 94, 133, 149, 152, 324,  
366, 370  
Тензиометр 207–209, 226, 753  
Тиссена метод 457  
Точечные данные 126, 155–157,  
192–193, 431, 520  
Транспирация 139, 545, 548, 654, 711,  
754  
Тросовая переправа 152, 170, 259  
Удельная влажность 548, 563  
Удельная водоотдача 45, 564  
Уровень моря средний 379, 578  
Успокоительный колодец 148–150  
Участок реки 150, 152, 166–168, 179,  
182, 505, 658, 660, 777, 783–784, 789  
Фруда число 38, 182  
Чувствительность 29, 55, 148, 181–182,  
206, 226, 247, 407, 611, 696  
Экосистема 31, 69, 673, 687  
Электропроводность воды 176, 227, 244  
Эпюра скоростей 155–158, 160, 171  
Эрозия 295, 672, 685, 723, 744, 748,  
797–798, 802

## **Разделы и подразделы ГОМС**

### **A Политика, планирование и организация**

A00 Политика, планирование и организация

### **B Проектирование сети**

B00 Проектирование сети

### **C Приборы и оборудование**

C00 Общие вопросы

C05 Качество воды, приборы для мониторинга нескольких переменных

C06 Температура воды

C10 Взвешенные наносы

C12 Донные наносы

C16 Химическое качество

C21 Биологическое качество

C25 Общие метеорологические данные; климатические и погодные станции

C26 Осадки, общие вопросы

C27 Осадки, ручной и суммарный осадкомеры

C30 Осадки, самопищий и телеметрический осадкомеры

C33 Осадки, измерения с помощью радара

C35 Температура воздуха

C37 Температура почвы

C39 Влажность

C41 Солнечные часы

C43 Солнечная радиация

C45 Испарение, общие вопросы

C46 Испарение, пруды и резервуары

C48 Испарение, лизиметры

C52 Скорость и направление ветра

C53 Снег, глубина и водный эквивалент

C55 Влажность почвы, общие вопросы

C56 Влажность почвы, пробоотборники почвы

C58 Влажность почвы, ядерные методы

C60 Влажность почвы, электрические методы

C62 Влажность почвы, тензометры

C65 Грунтовая вода, уровень

C67 Грунтовая вода, регистрирующие устройства для скважин

C71 Уровень воды

C73 Речной расход, лотки, водосливы, ультразвуковой и электромагнитный методы

C79 Скорость движения воды, гидрометрические вертушки или поплавки

C85 Речная гидрометрия, общие вопросы

C86 Речная гидрометрия, переправы, канаты

C88 Речная гидрометрия, краны, мосты, лебедки и барабаны

C90 Речная гидрометрия, оборудование для использования на лодках

C92 Измерения льда

### **D Дистанционное зондирование**

D00 Дистанционное зондирование

### **E Методы наблюдения**

E00 Общие вопросы

E05 Качество воды

E09 Наносы

E25 Метеорологические наблюдения для гидрологии

E53 Снег и лед, гляциология

E55 Влажность почвы

E65 Грунтовые воды

E70 Поверхностные воды, уровень и сток

E71 Уровень воды

E73 Измерение расхода

E79 Измерения скорости, использование гидрометрических вертушек  
E85 Оценка гидрологических характеристик с использованием карт  
E88 Съемка

#### **F Передача данных**

F00 Передача данных

#### **G Поиск, хранение и распространение данных**

G00 Общие вопросы  
G05 Нормы, руководства и рекомендации  
G06 Системы хранения гидрологических данных  
G08 Системы хранения данных о поверхностных водах  
G10 Системы хранения данных о грунтовых водах: уровни, гидрохимия, дебит скважин и расход  
G12 Системы хранения метеорологических данных  
G14 Системы хранения данных о качестве воды  
G20 Программы систематизации гидрологических данных  
G25 Гидрологические ежегодники  
G30 Системы распространения данных или информации  
G40 Передача информации между административными органами, нормы, рекомендации, руководства и методы кодирования  
G42 Передача информации между административными органами, программы выполнения норм в соответствии с G40

#### **H Первичная обработка данных**

H00 Системы обработки различных типов данных. Стандарты, рекомендации, руководства и т.п. по первичной обработке данных  
H05 Общие данные о качестве воды  
H06 Данные о температуре воды  
H09 Данные о транспорте наносов  
H16 Данные о химическом качестве  
H21 Данные о биологическом качестве  
H25 Общие метеорологические данные для использования в гидрологии  
H26 Данные об осадках (не радарные)  
H33 Радарные данные об осадках, включая калибровку путем сравнения с телеметрическими осадкомерами  
H35 Данные о температуре воздуха  
H39 Данные о влажности воздуха  
H41 Данные о солнце, солнечных часах и радиации  
H45 Данные об испарении  
H52 Данные о ветре  
H53 Данные о снеге и льде, снежном покрове, толщине, водном эквиваленте  
H55 Данные о влажности почвы  
H65 Данные о грунтовых водах  
H70 Поверхностные воды (уровень и сток), общие вопросы  
H71 Данные об уровне воды  
H73 Данные о расходе  
H76 Получение калибровочных кривых, расчет расхода по значениям уровня с помощью калибровочных кривых  
H79 Данные о скорости течения воды, расчет расхода по точечным измерениям скорости  
H83 Обработка исторических данных о паводках

#### **I Вторичная обработка данных**

I00 Общие вопросы  
I05 Общие данные о качестве воды  
I06 Данные о температуре воды (включая ледовые явления на реках)  
I09 Данные о транспорте наносов  
I25 Общие метеорологические данные для применения в гидрологии  
I26 Данные об осадках  
I36 Атмосферное загрязнение

- I41 Данные о солнце, солнечных часах и радиации
- I45 Испарение. Общие вопросы
- I50 Испарение, расчеты по данным метеорологических измерений
- I53 Данные о снеге
- I55 Данные о влажности почвы
- I60 Водный баланс
- I65 Уровни грунтовых вод
- I71 Данные об уровне воды
- I73 Данные о расходе
- I80 Минимальный сток
- I81 Паводки и анализ частоты паводков

#### **J Модели гидрологического прогнозирования**

- J04 Прогнозирование речного стока по гидрометеорологическим данным
- J10 Расчет гидрографа стока для прогнозирования
- J15 Объединенные модели расчета и прогнозирования речного стока
- J22 Прогнозирование сезонного стока
- J28 Прогнозирование минимального стока
- J32 Прогнозирование влажности почвы
- J45 Ледовые прогнозы
- J54 Прогнозирование температуры поверхностных вод
- J55 Прогнозирование качества поверхностных вод
- J65 Прогнозирование количества наносов
- J80 Анализ использования моделей

#### **K Гидрологический анализ для планирования и расчета инженерных сооружений и водных систем**

- K10 Региональный анализ
- K15 Изучение паводков в конкретных местностях
- K22 Моделирование зависимости стока от дождевых осадков
- K35 Моделирование и расчет речного стока
- K45 Расчет для водохранилищ и озер
- K54 Изучение температуры воды
- K55 Изучение качества воды
- K65 Изучение наносов
- K70 Оценка проектов по водным ресурсам
- K75 Стратегия конструирования и работы водохранилищ

#### **L Грунтовые воды**

- L10 Анализ данных, полученных в колодцах и буровых скважинах
- L20 Модели водоносных горизонтов
- L22 Калибровка и проверка моделей грунтовых вод
- L30 Прогнозирование грунтовых вод

#### **X Математические и статистические расчеты**

- X00 Математические и статистические расчеты

#### **У Обучающие средства (пособия и приборы) в оперативной гидрологии**

- У00 Учебные средства в оперативной гидрологии