

Российское научно-техническое общество судостроителей
имени Алексея Николаевича Крылова
Сахалинское отделение

Российская академия наук
Дальневосточное отделение
Специальное конструкторское бюро
средств автоматизации морских исследований

На правах рукописи

ХРАМУШИН ВАСИЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ДИНАМИКА ДЛИННОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ШЕЛЬФЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ**

Спеальность:
25.00.29. Физика атмосферы и гидросфера

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук.

Южно-Сахалинск – ירושלים
2005.06.01 – 2017.08.09 ...

Содержание

Введение	7
Предисловие	24
 Глава 1. Автоматизированные системы контроля морских акваторий и методы прогноза опасных морских явлений.....30	
1.1. Опасные морские явления и их воздействие на морские инженерные сооружения31	
<i>Ветровое волнение на море.....31</i>	
<i>Изменение уровня моря и штормовой нагон.....32</i>	
<i>Сейши и тягун в портах.....34</i>	
<i>Морские гидрологические прогнозы.....35</i>	
<i>Сводные гидрометеорологические характеристики района исследований.....37</i>	
1.2. Гидродинамические особенности проявления длинноволновой динамики моря вблизи побережья.....40	
1.3. Исходные физические определения и батиметрическая информация в построении вычислительных экспериментов44	
<i>Гидродинамические вычислительные эксперименты47</i>	
<i>Батиметрические архивы для построения длинноволновых вычислительных экспериментов49</i>	
<i>Создание уточненного батиметрического массива по Охотскому морю и прилегающим акваториям50</i>	
<i>Батиметрические массивы из Мировых центров данных52</i>	
1.4. Комплексное использование вычислительных экспериментов, мореографных и экспедиционных наблюдений.....54	
<i>Контроль длинноволновых процессов в Японском море на Холмском мареографе55</i>	
<i>Бортовой комплекс контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля.....57</i>	
<i>Сверхмалый телекоммуникационный гидрофизический модуль для решения задач оперативного контроля морских акваторий61</i>	
<i>Длинноволновое районирование побережья с борта экспедиционного судна.....63</i>	
1.5. Использование новых разработок в морских службах и центрах предупреждения об опасных морских явлениях72	
<i>О гидрофизической станции на свale глубин вблизи м. Левенорна72</i>	
<i>Использование прямого численного моделирования в действующих службах предупреждения об опасных морских явлениях74</i>	

Глава 2. Математические и алгоритмические модели для построения вычислительных экспериментов при решении длинноволновых гидродинамических задач	76
 2.1. О постановке и численном решении длинноволновых задач.....	79
<i>Построение численных схем на векторных формализациях.....</i>	<i>80</i>
<i>Логика создания вычислительных моделей и компьютерных алгоритмов для построения вычислительных экспериментов</i>	<i>84</i>
<i>Арифметические и логические формализации вычислительных объектов и процессов</i>	<i>86</i>
 2.2. Определение цели, содержания и методологии проектирования вычислительного эксперимента	88
<i>Особенности языковой среды программирования</i>	<i>93</i>
<i>Среда программирования на основе языка С++</i>	<i>95</i>
<i>Вычислительные операции с элементарными жидкими частицами и их физическая интерпретация.....</i>	<i>98</i>
<i>Построение числовых массивов для моделирования пространственных гидродинамических полей</i>	<i>102</i>
 2.3. Построение программных алгоритмов для изучения длинноволновой динамики уровня моря	108
<i>Логическая структура обобщенного программного комплекса</i>	<i>109</i>
<i>Особенности реализации вычислительного эксперимента для моделирования длинных волн на мелкой воде</i>	<i>112</i>
<i>Кинематическая модель расчета волновых фронтов и лучей</i>	<i>125</i>
<i>Вычислительная модель гидродинамического режима на основе уравнений длинных волн в полных потоках.....</i>	<i>129</i>
<i>Условия и критерии моделирования</i>	<i>131</i>
<i>Методы обеспечения качества численного моделирования длинноволновых процессов.....</i>	<i>134</i>
 2.4. «Гидродинамическая модель очага цунами»	136
<i>Формальные подходы к построению очага цунами.....</i>	<i>137</i>
<i>Уровень техники в реализации и использовании вычислительной модели</i>	<i>138</i>
<i>Регламент использования макросейсмического очага цунами</i>	<i>139</i>
<i>Форма сейсмического очага и результаты моделирования цунами..</i>	<i>143</i>
 2.5. «Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна»	145
<i>Физика и геометрия подвижного очага длинных волн</i>	<i>146</i>
<i>Методы практического использования вычислительного эксперимента по моделированию атмосферных воздействий</i>	<i>147</i>

<i>Постановка вычислительного эксперимента по моделированию штормовых нагонов</i>	149
<i>Заключение по вычислительным моделям</i>	152
Глава 3. Программная реализация длинноволновых вычислительных экспериментов.....	154
<i>Состав программного комплекса</i>	158
<i>Формат представления батиметрических данных</i>	160
3.1. Модуль «ANI» - моделирование длинноволновых процессов	163
<i>Процедура расчетов и построения кинематических полей.....</i>	170
<i>Проведение полного вычислительного моделирования</i>	171
<i>Доступ к историческим архивам по землетрясениям и цунами.....</i>	174
3.2. Модуль «MARIO» - анализ временных рядов	175
3.3. Основные варианты практического использования программного комплекса	179
<i>Регламент вычислений для уточненного прогноза цунами.</i>	190
Глава 4. Реализация длинноволновых вычислительных экспериментов для морских инженерных изысканий и оперативного контроля морских акваторий.....	193
4.1. Оценка штормовой гидродинамики шельфа Курильских островов	193
<i>Оперативное моделирование развития шикотанского цунами 5 октября 1994 г.....</i>	198
4.2. Моделирование приливного режима	203
<i>Постановка задачи о выявлении резонирующих участков морского дна с помощью гидродинамических вычислительных экспериментов</i>	205
<i>Оценка собственных длинноволновых колебаний на акватории Охотского моря.....</i>	206
<i>Результаты прямого численного моделирования приливного режима в Охотском море</i>	212
<i>Прямое численное моделирование прилива на Земном шаре.....</i>	217
4.3. Исследование гидродинамического режима на акватории Холмского морского порта	218
<i>Проектные особенности Холмского морского торгового порта</i>	220
<i>Вычислительные эксперименты для выявления аккордов собственных длинноволновых колебаний</i>	221
<i>Численное моделирование длинноволнового режима на подходах к Холмскому порту.</i>	223
<i>Численное моделирование резонансных колебаний уровня моря на акватории Холмского порта</i>	225

4.5. Районирование южной части острова Сахалин по проявлениям морских наводнений	231
<i>Характер собственных длинноволновых колебаний уровня моря на открытом побережье и в закрытых акваториях морских заливов</i>	235
<i>Моделирование штормового нагона 7-8 ноября 1995 года.....</i>	239
<i>Моделирование штормовых нагонов на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин</i>	244
<i>Гипотетическое цунами от катастрофического землетрясения с охотоморской стороны от Северных Курил.....</i>	246
<i>Оценка результатов вычислительных экспериментов и реальных наблюдений с борта судна в открытом море.....</i>	250
<i>Выводы</i>	254
Общее заключение.....	256
Список использованных источников	264

Основные обозначения

g	- ускорение силы тяжести, м/с ²
h	- высота волны (индивидуальной или в синоптический срок), м
h_b	- высота обрушающейся волны, м
D	- глубина моря в точке измерения, м
$H = \eta + D$	- полный уровень моря, с учетом высоты волны, м
φ	- географическая широта в расчетной точке, °, ′, ″
φ_o	- приведенная широта Меркаторской карты, °, ′, ″
T	- абсолютный отсчет времени, с
t	- расчетный интервал времени, с
p	- точечное (скалярное) давление, кг/(с ² ·м)
r	- геометрический тензор локальной системы отсчета
$\hat{\vec{r}} = \vec{r}_i = r_{ij}$	- тензор формы крупной частицы жидкости
ρ	- скалярная (точечная) плотность жидкости, кг/м ³
$\overset{\wedge}{\rho} = \overset{\wedge}{\rho}^j = \rho^{kj}$	- тензор внутреннего состояния жидкой частицы, кг/м ³
\vec{V}	- скорость в абсолютной системе отсчета, м/с
\vec{v}	- вектор приращения скорости за интервал времени t , м/с
$\hat{v} = \overset{\Delta}{\vec{r}}$	- синтезированный тензор локальных скоростей (приращений скорости для базисных осей тензора формы), м ³ /с
$\hat{v} = \hat{v} \cdot \hat{r} = \hat{v}/\hat{r}$	- тензор конвективных скоростей, 1/с
\hat{f}	- тензор напряжений на границах жидкой частицы, Н·м ²
$\overset{>}{m} = m^i_j = \overset{\wedge}{\rho} \cdot \hat{r}$	- смешанный тензор, соотносящий внутреннее состояние частицы жидкости на абсолютную систему отсчета [кг];
$\overset{T}{\vec{R}}$	- координаты узла сеточной области Ω на момент времени Т
$\overset{+}{\vec{R}}$	- координаты смежной точки в следующий момент времени
Δt	- дискретизация временного ряда, с
k	- волновое число, 1/с
L	- длина гребня волны, м
β	- направление распространения волн, курсовой угол, °
λ	- длина волны, м
τ	- характерный период волнения, м
ζ	- аппликата волновой поверхности, м
ω	- угловая частота, 1/с
$\frac{\partial}{\partial \vec{r}}$	- тензорное определение пространственной производной, 1/м ³
$C = \sqrt{(gh)}$	- скорость длинной прогрессивной гравитационной волны, м/с

УДК 519.67, 551.461

Введение

Сахалинская область – единственная область в Российской Федерации, которая расположена на многочисленных островах в Японском, Охотском морях и в Тихом океане. Область является уникальным для России морским регионом, географическое положение которого обязывает активно развивать системы мониторинга и контроля морских акваторий, поддерживать эффективность функционирования морских служб и действенность систем предупреждения об опасных морских, метеорологических и сейсмических явлениях.

Развитие систем контроля и наблюдения за обстановкой на море знаменуется активной интеграцией идей и методов исследования Мирового океана, быстрым внедрением новых технических средств и телеметрических систем оперативного обнаружения потенциально опасной динамики взаимодействия атмосферы и океана, катастрофических процессов геофизического или техногенного характера.

Современные технические средства контроля состояния моря развиваются на фоне возрастающих возможностей вычислительной техники. Это открывает перспективы активного использования прямого численного моделирования гидродинамических процессов в открытом океане и вблизи защищаемых участков морского побережья. В режиме автоматического построения вычислительных экспериментов, с опорой на использование телеметрических систем оперативного контроля динамики моря и атмосферы, новые методы численного моделирования способны дать заблаговременный прогноз развития опасной ситуации на море и позволяют предварительно изучить гидродинамические условия при обустройстве морской инфраструктуры и проектировании морских стационарных и плавучих инженерных сооружений.

При оперативном анализе информации о состоянии моря, непрерывно поступающей по телеметрическим каналам связи, могут, также, использоваться данные от других систем наблюдения, к примеру, материалы дистанционного зондирования Земли из космоса, но все эти разрозненные во времени и пространстве данные могут быть увязаны с помощью единой модели состояния моря и атмосферы, построенной на основе непрерывного численного моделирования гидрофизических процессов в морских акваториях.

В настоящем исследовании созданы теоретические основы, разработаны новые математические модели и технические средства измерений, реализовано программное обеспечение ЭВМ и методы комплексного изучения длинноволнового режима в открытом море, в мелководной шельфовой зоне и на акваториях закрытых бухт и гаваней портов, необходимых для гидротехнических изысканий и контроля потенциально опасных морских явлений, а также для принятия эффективных решений по защите прибрежной инфраструктуры и минимизации ущерба от геофизических катастроф на море.

Актуальность темы диссертации.

Высокая штормовая и сейсмическая активность морских акваторий Сахалинской области, особенно вблизи Курильских островов, требует постоянного изучения физики и гидродинамики столь грозных явлений природы, должный контроль и заблаговременный прогноз потенциально опасных проявлений которых, является ключевым условием эффективного развития морской экономики всего Дальнего Востока России.

Актуальность выполненных исследований обусловлена быстрым обновлением средств вычислительной техники и телеметрических систем сбора оперативной информации о состоянии моря, что при активном использовании вычислительных экспериментов по моделированию динамики океана дает возможность существенного

повышения эффективности работы всех морских служб, активизации морских работ и изысканий, которые на прежнем техническом уровне были слишком дорогостоящими или принципиально нереализуемы.

Объектом исследования являются гидродинамические процессы на шельфе дальневосточных морей России. Изучение опасных морских наводнений, экстремальных прибрежных течений и разрушительных волн цунами в настоящее время стало возможным с использованием современных технических средств наблюдения за состоянием моря и прямых вычислительных экспериментов. Совместное использование материалов наблюдения и результатов прямого численного моделирования длинноволновых процессов в открытом море, позволяет глубже исследовать особенности зарождения и развития опасных морских явлений, доведя новые технические решения до уровня оперативного использования в системах предупреждения и обеспечения безопасности на море.

Цель и задачи исследования.

Главной целью диссертационных исследований является комплексное изучение природы опасных морских явлений и поиск технических решений для оперативного прогноза и минимизации негативных последствий морских штормов, наводнений, экстремальных течений и цунами.

Разработанные технические средства и новые математические модели изначально ориентированы на поиск эффективных методов предотвращения ущерба от морских катастроф природного и техногенного характера, на безусловное поддержание безопасности мореплавания и обеспечение устойчивости морской инфраструктуры Сахалинской области в целом.

Комплекс поставленных задач разделен группу взаимосвязанных направлений исследований, с единых позиций освещивающих

изучение гидродинамических процессов в океане; условий возникновения и развития потенциально опасных морских явлений, и обосновывающих научно-технические решения для их заблаговременного прогноза.

1) Решена задача о методах регистрации поверхностных течений, штормового волнения, морской зыби и длинноволновых процессов в открытом море и на мелководном шельфе и созданы новые математические модели, предназначенные для прогноза и предотвращения морских аварий и катастроф. Для практического использования результатов исследований были созданы новые высокоточные батиметрические массивы, проведены прибрежные и морские экспедиции, позволившие верифицировать вычислительные эксперименты и отработать сценарии получения оперативных прогнозов опасных морских явлений (*глава 1*);

2) Созданы новые математические модели гидромеханики, изначально ориентированные на проведение прямых вычислительных экспериментов, в которых все расчетные объекты представлены в обобщенной тензорной форме, наилучшим образом соответствующей архитектуре цифровых дискретных ЭВМ. Новый метод проектирования больших программных комплексов привел к возможности непрерывного сопоставления и взаимной адаптации результатов гидродинамического моделирования и оперативных наблюдений за реальным состоянием моря (*глава 2*);

3) Разработаны новые программные комплексы, позволяющие не только анализировать длинноволновые процессы в океане, но и проводить быстрые вычислительные эксперименты с целью выявления и прогноза развития опасных морских явлений в открытом море и его прибрежных акваториях (*глава 3*);

4) Отработаны новые технические решения и методы морских инженерных гидротехнических изысканий и оперативных прогнозов

опасных морских явлений, выполняемых при минимально доступной информации для постановки гидродинамических вычислительных экспериментов, с возможностью последовательного уточнения результатов моделирования по мере проведения морских экспедиционных работ или поступления оперативных данных о реальном развитии опасных морских явлений (*глава 4*).

На настоящем этапе, реализованные вычислительные эксперименты позволяют решать следующие ключевые задачи гидродинамики океана и воздействия волн на морское побережье:

- изучение длинноволнового режима в открытом море, мелководной шельфовой зоне и на акваториях закрытых бухт и гаваней портов;
- численные гидротехнические изыскания волнового режима при строительстве морских инженерных сооружений;
- инженерные и оперативные расчеты с целью прогноза проявления длинных волн на конкретных участках морского побережья, и с целью поиска эффективных технических решений по минимизация ущерба от грядущих геофизических катастроф на море.

Методологические основы и источники исследования

Основным методом исследования явилось построение унифицированного логического, математического и алгоритмического аппарата для проектирования и построения вычислительных экспериментов гидромеханики, содержащего внутренние средства для анализа корректности проводимых вычислений.

Цифровые ЭВМ позволяют аппроксимировать непрерывные поля и моделировать процессы гидроаэромеханики только с помощью дискретных шагов во времени и малых элементарных объемов в пространстве – крупных частиц жидкости. В настоящей работе показываются результаты обобщений численных схем, выполненных при поиске эффективных компьютерных алгоритмов решения при-

кладных задач гидромеханики. Конечноразностные дифференциалы удалось формализовать в рамках тензорного исчисления, дающего возможность линейной интерполяции физических параметров между смежными пространственными ячейками и их расчетными узлами. Такой вычислительный инструмент, как оказалось, не только упрощает форму представления традиционных расчетных схем, но и способен претендовать на своеобразный теоретический анализ некоторых явлений и парадоксов механики сплошных сред. В тензорной модели гидромеханики всегда учитываются конвективные составляющие течений; имеется возможность контроля физической корректности моделируемых процессов непосредственно в ходе вычислений; уточняются некоторые новые явления и парадоксы механики жидкостей, от которых зависит принципиальная возможность и качество постановки вычислительных экспериментов.

Инструментальная поддержка исследований обеспечивалась созданием специальной среды программирования, содержащей необходимый набор графических и картографических функций для гибкого построения сложных численных моделей длинноволновой динамики океана, и обеспечивающей сквозной анализ всех вычислительных объектов и алгоритмических процессов ЭВМ. Соблюдение методических разработок стало возможным на пути создания полно-го комплекса программного обеспечения, поддерживающего автоматизированные режимы подготовки исходных данных, проведение и анализ результатов гидродинамических вычислительных экспериментов.

Источником исследований явились традиционные конечно-разностные схемы численного решения систем дифференциальных уравнений механики сплошных сред в частных производных:

- прямые вычислительные эксперименты с использованием крупных частиц жидкости (метода конечного объема);

- функционально-алгоритмическая унификация систем разностных уравнений с помощью тензорных формализаций;
- формирование численных моделей и разделение процессов вычислений по принципу допустимости сквозного физического контроля всех расчетов в размерной форме;

Для верификации новых математических моделей активно использовались прибрежные и морские экспедиционные исследования гидродинамики морских инженерных сооружений, океана, атмосферы и их взаимодействия, в том числе выполненные под непосредственным руководством автора работы.

На защиту выносятся следующие основные результаты работы:

1. Новые технические решения для непрерывной регистрации гидродинамических условий в открытом море и вблизи побережья, опирающиеся на телеметрические средства доставки информации с прибрежных и судовых гидрометеопостов. Регистрация морского волнения выполнена с помощью цифровых инклинометров; длинноволновых пульсаций поверхностных течений – с помощью навигационных приемников GPS. Создан и опробован телеуправляемый гидрофизический модуль, доставляющий информацию о глубине моря, температуре воды и волновой динамике поверхности моря по цифровому радиоканалу.

2. Новый специальный вычислительный аппарат для систем конечноразностных уравнений в тензорной форме, согласованный с методом непротиворечивого проектирования сложных алгоритмов и программных комплексов для численного решения прикладных задач длинноволновой гидродинамики, взаимодействия атмосферы и океана. Новые средства программирования обеспечивают решение широкого круга длинноволновых задач с использованием ограниченных вычислительных ресурсов, доступных в условиях работы

оперативных служб, морских экспедиций и автоматических систем мониторинга морских вод;

3. Новый программный комплекс и законченные методические разработки для численного решения морских инженерных и оперативных задач, основанных на прямых гидродинамических вычислительных экспериментах по моделированию цунами, штормовых нагонов, приливного режима, собственных длинноволновых колебаний на акваториях заливов и гаваней портов. Комплекс программ дополнен процедурами для работы со средствами регистрации текущего состояния моря, для подготовки исходных данных и анализа результатов вычислительных экспериментов.

Научная новизна исследования заключается в создании новых технических средств и методов комплексного контроля длинноволнового режима в открытом океане и его прибрежных акваториях. Разработаны и испытаны в реальной практике прибрежные и судовые регистраторы уровня моря и морских течений, успешно опробованы новые методы проектирования сложных компьютерных алгоритмов для построения вычислительных экспериментов в гидромеханике океана и атмосферы, морских течений и колебаний уровня моря, предназначенных для решения прикладных задач обеспечения безопасности мореплавания и защиты морских инженерных сооружений от морских наводнений и цунами.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решены следующие научно-технические задачи:

- Представлена комплексная постановка задачи о выявлении и численном моделировании опасных для мореплавания штормовых волн, наводнений и экстремальных течений вблизи побережья. Предложены технические средства и новые информационно-вычислительные технологии для прогноза опасных морских явлений.

ний, предотвращения штормовых кораблекрушений и минимизации ущерба от морских катастроф природного и техногенного характера;

- Созданы теоретические основы и методы практической реализации вычислительных экспериментов в гидромеханике, основанных на функциональной проработке метода непротиворечивого проектирования больших комплексов программ и на обобщении конечноразностных систем уравнений с помощью тензорных формализаций, позволяющих проводить сквозной анализ и контроль корректности всех вычислительных процессов на цифровой ЭВМ;

- Реализован программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов и анализа данных о состоянии морских акваторий, позволяющий в наглядной графической форме управлять всеми моделируемыми процессами, распараллеливать вычисления на сетевых компьютерах и совместно анализировать как расчетные, так и телеметрические материалы, поступающие от гидрофизической и сейсмической подсистем контролю морских акваторий;

- Выделены типовые расчетные сценарии проведения вычислительных экспериментов: «краткосрочный прогноз», «штормовой режим», «кризисный контроль», «гидрографические изыскания», «режимный контроль морских акваторий» и «повседневные морские научные исследования». Разработана методология выбора модели представления внешних воздействий для характерных задач мониторинга и контроля морских акваторий и соответствующих этим задачам математических моделей, пригодных для повседневного или оперативного использования в рамках выбранного сценария функционирования морского академического центра, морских служб и центров штормовых и тревожных оповещений.

При разработке нового математического обеспечения использовано множество авторских решений, которые позволили существенно ускорить вычислительные процессы и объединить решение

всего комплекса задач длинноволновой динамики океана в виде единой информационно-вычислительной системы.

В русле поиска новых методик для решения традиционных гидротехнических задач, связанных с изучением волнового режима в закрытых акваториях, разработаны специальные вычислительные эксперименты для оптимального проектирования новых портовых сооружений и реконструкции гавани, позволяющие улучшить штормовую защищенность и условия эксплуатации морского порта.

Практическая ценность

Новые технические решения и реализованные комплексы компьютерных программ предназначены для совершенствования и качественного информационно-аналитического перевооружения морских служб контроля состояния моря и прогноза опасных морских явлений, что необходимо для реального повышения безопасности морских производственных работ и мореплавания на морских коммуникациях Дальнего Востока России.

В настоящее время информационно-вычислительный комплекс активно используется в научно-исследовательских работах Сахалинского государственного университета, связанных с изучением динамики атмосферы и океана, особенностей приливного режима в Охотском море, при выполнении исследований опасных морских явлений, таких как цунами и штормовые нагоны. Основное математическое обеспечение подготовлено к внедрению в практическое использование в условиях оперативных служб и морских отделов гидрометеослужбы.

Разработанные методы проектирования и реализации гидродинамических вычислительных экспериментов носят универсальный характер и могут активно задействоваться в исследованиях природы Мирового океана, а также найти практическое применение в судовых бортовых системах контроля условий мореплавания; в качестве

инструментального средства для автоматизированного анализа обстановки на море; в том числе с использованием телеметрических данных от автономных морских измерительных комплексов и систем дистанционного мониторинга состояния моря и атмосферы.

Новый информационно-вычислительный комплекс выполнен в виде графической экспертно-информационной системы, обеспечивающей объединение и унификацию работы с океанологической, гидрометеорологической и сейсмологической информацией, приспособлен к решению задач в условиях оперативной службы предупреждения об опасности цунами, штормовых нагонов, тягунов в портах и других опасных морских явлениях.

Прикладное значение результатов исследований по моделированию длинноволновых гидродинамических процессов представляется в инженерных гидротехнических изысканиях, в подготовке оперативных прогнозов опасных морских явлений и проведении научных исследований гидродинамического режима в морских акваториях Дальнего Востока России.

Новые разработки пригодны для практического моделирования цунами, штормовых нагонов и приливного режима, что уже сейчас может быть активно использовано в повседневной практике ведомственных оперативных служб и режимных отделов Управлений по гидрометеослужбе, ведущих наблюдение за состоянием моря.

Основное содержание исследований

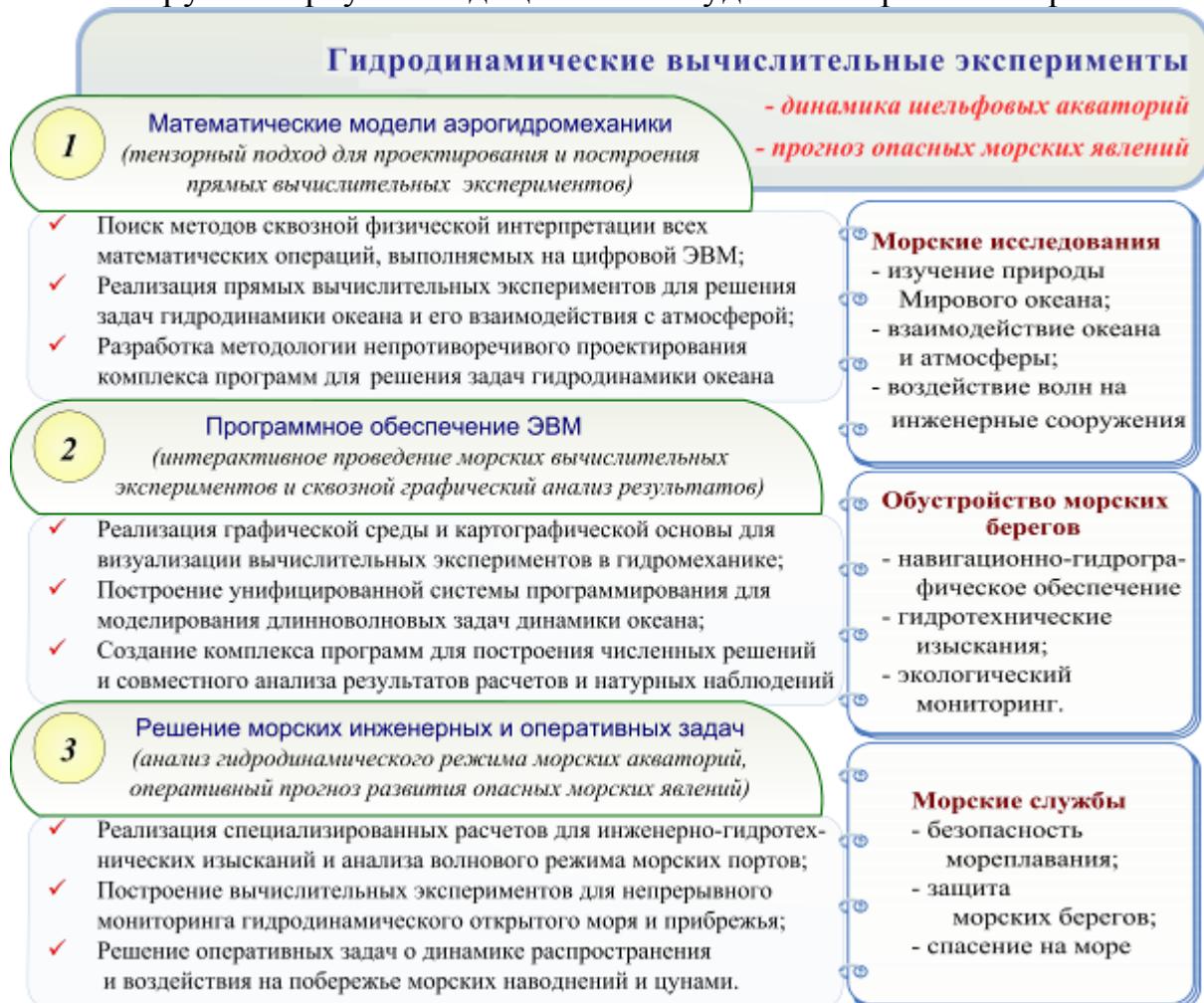
Работа посвящена изучению длинноволновой гидродинамики морских и шельфовых акваторий, поиску эффективных методов прогноза и предупреждения о потенциально опасных морских явлениях, созданию новых средств регистрации морского волнения и методов обеспечения безопасности штормового мореплавания и защиты морской инфраструктуры от опасных морских явлений и морских катастроф природного и техногенного характера.

В первой главе рассматриваются общие вопросы гидродинамики морских акваторий и анализируются современные методы решения актуальных океанографических задач, связанных с оперативным выявлением опасных морских явлений, обеспечением безопасности штормового мореплавания и мониторингом морских и прибрежных акваторий при решении различных задач обустройства морского побережья и контроля экологических процессов в морских водах и на морском побережье. Показываются новые технические средства для телеметрического контроля длинноволновых процессов в открытом море и вблизи побережья, освещаются вопросы создания батиметрических материалов для проведения вычислительных экспериментов.

Во второй главе рассматриваются методы проектирования и практической реализации эффективных алгоритмов для решения инженерных задач механики сплошных сред. С этой целью предложены новые математические модели, основанные на тензорных формализациях элементарных объектов и операций, в наибольшей степени соответствующих аппаратной и программной среде современных одно- и многопроцессорных вычислительных комплексов.

В третьей главе представлены конкретные программные разработки для постановки и проведения длинноволновых вычислительных экспериментов по моделированию цунами, морских наводнений и течений, обусловленных атмосферными циклонами и тайфунами, а также для прямого моделирования приливного режима в открытом океане и полузакрытых морях. Программный комплекс дополнен утилитами для подготовки вычислительных экспериментов (*географические, батиметрические, приливные и сейсмические информационные системы*), и последующего анализа результатов моделирования и сопоставления их с реальными наблюдениями за динамикой моря.

В четвертой главе приведены результаты длинноволновых вычислительных экспериментов для решения инженерных гидротехнических задач; для экспертного обеспечения оперативных служб прогноза и предупреждения о цунами и морских наводнениях, вызванных штормами на море. Здесь же результаты численного моделирования сопоставляются с реальными наблюдениями за длинноволновой динамикой моря, измеренной с помощью высокоточных регистраторов уровня на базе метеографа в Холмском морском торговом порту и по ежесекундным замерам поверхностных течений по GPS-навигатору на борту экспедиционного судна в открытом море.



Функциональная схема исследований, составленная в проектном направлении - «снизу–вверх», от имеющихся теоретических разработок - к реализации конкретного класса прикладных задач в области гидродинамических вычислительных экспериментов.

Логическая схема диссертационной работы построена по принципу исследования фундаментальных математических законов механики сплошных сред, ориентированных на решение широкого круга прикладных задач гидромеханики океана, атмосферы и их воздействия на морские стационарные и плавучие инженерные сооружения. В практическом использовании круг реализованных математических моделей сужается для решения конкретных инженерных задач, в данном случае - длинноволновой гидродинамики океана. Применимость новых вычислительных технологий расширяется прикладными задачами для решения гидротехнических задач и оперативного моделирования опасных морских явлений, которые доведены до уровня практического внедрения в действующие морские службы.

Диссертационная работа выполнена в рамках плановых научных исследований Санкт-Петербургского морского технического университета (1983-1986), Института морской геологии и геофизики (1987-1995), СКБ средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (1996-2005) и Сахалинского государственного университета (2006...).

Теоретическая основа работы создавалась в середине 80-х годов прошлого века при активном участии научных коллективов кафедр гидромеханики и прикладной математики Ленинградского ордена Ленина кораблестроительного института (ЛКИ, *ныне Санкт-Петербургского морского технического университета*), где при участии профессора *A. H. Шебалова* отрабатывались новые численные методы решения задач трехмерной волновой гидродинамики. Тогда же, при поддержке *B. B. Амфилохива, B. B. Мукосеева, A. Ш. Ачкаинадзе и Н. Н. Сунцова* были созданы основы трехмерной тензорной гидромеханики (*глава 2*), позволявшей на всех этапах проектирования и реализации вычислительных экспериментов со-

хранять возможность сквозной физической интерпретации всех математических объектов и операций, выполняемых на ЭВМ. Логическую замкнутость сложных программных комплексов, в активных дискуссиях тех же лет о методах функционального программирования с системными программистами ВЦ ЛКИ *А. В. Беляевым* и *И. И. Ивановым*, удалось связать с обеспечением функциональной независимости расчетных процедур, как своеобразных физических «явлений», связанных строгими логическими и математическими «законами».

Инженерные подходы в реализации новых математических моделей и экспериментальное опробование элементарных численных решений в задачах нестационарной гидромеханики и при исследовании воздействия волн большой амплитуды на инженерные сооружения, выполнены под руководством профессора кафедры теория корабля ЛКИ *А. Н. Холодилина*. С этой целью выполнена разработка специальных методов проектирования больших программных комплексов для ЭВМ, способных в интерактивном режиме представлять и совместно анализировать обширные числовые материалы вычислительных и опытных экспериментов.

К современному виду все математические модели и исполняемые программные модули приведены при выполнении утвержденных Дальневосточным отделением Российской академии наук (ДВО РАН) планов и заданий на проведение фундаментальных исследований лаборатории вычислительной гидромеханики и океанографии (ВГиО) СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, затем лабораторией вычислительной гидромеханики и морских исследований (ВГиМИ) Сахалинского государственного университета, ранее возглавляемых автором настоящей диссертации.

Общая архитектура прикладных математических разработок определилась грантами Российского фонда фундаментальных исследо-

дований № 97.05.66037 «Математическое и вычислительное моделирование приливного режима и режима течений в Охотском море»; и № 97-01-96010 «Теоретические исследования и численное моделирование камчатских цунами, вопросы совершенствования единой дальневосточной системы предупреждения о цунами».

Плановые исследования по программам изучения природы Мирового океана позволили сконцентрировать основное внимание на создании новых средств измерения, поиске методических разработок и построении логических критериев оптимального проектирования гидродинамических вычислительных экспериментов, предназначенных для моделирования процессов взаимодействия атмосферы и океана; возникновения и развития опасных морских явлений, которые должны исполняться с учетом возможного поступления telemetryических данных о реальном состоянии моря.

В результате, представленные в работе комплексы математического обеспечения оказались ориентированными как на проведение лабораторных и экспедиционных исследований по академическим программам, так и на использование в условиях оперативных и морских отделов при региональных Управлениях по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Сахалинского, Камчатского, Магаданского, Приморского и Хабаровского). Территориально автор тяготеет к Сахалину, поэтому так часты в тексте ссылки на Сахалинское УГМС, Центр мониторинга окружающей среды и Центр цунами которого явились естественными полигонами для опробования всех теоретических разработок и завершенных программных комплексов.

Автор приносит глубокую благодарность *И. В. Файну* (ИТМО, г. Минск), который активно занимался численным моделированием цунами на Сахалине еще в 1986 году, и продолжающий плодотворное сотрудничество в этом направлении до сего дня. В создании и

анализе математических моделей и специальных расчетных алгоритмов в последние годы самое активное содействие оказывал *B. B. Иванов*; сценарии управления программным комплексом создавались под пристальным вниманием *A. A. Поплавского*. Исторические землетрясения и цунами, в том числе включенные в виде баз данных для автоматического использования при подготовке вычислительных экспериментов, созданы и любезно предоставляются *B. K. Гусяковым* (ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск).

Особо хочется отметить доброжелательность и всемерную поддержку морских исследований командиром в/ч 13148 Гидрографической службы Тихоокеанского флота, капитаном II ранга *Д.Ю. Шешениным*, командиром Корсаковского дивизиона гидрографических судов, капитаном III ранга *И. А. Тихоновым*, и директором Холмского морского торгового порта *B. П. Боровиковым*, создавших исключительно благоприятные условия для длительных измерений волновой гидродинамики и процессов взаимодействия атмосферы и океана с борта гидрографических судов в открытом море и в гавани Холмского порта. В экспедиционных исследованиях активное участие принимали все сотрудники лаборатории вычислительной гидромеханики и океанографии, но особо хочется отметить *B. A. Шустина*, *A. B. Файн*, *A. C. Корытко*, *R. P. Бернгардта* и *A. И. Павликова*, творческая активность которых привела получению интереснейших теоретических и практических результатов.

Теоретические исследования, создание информационных систем и программного обеспечения выполнены при безусловной поддержке и всестороннем содействии руководителя научных программ, заслуженного деятеля науки России *M. L. Красного*, инициировавшего и создавшего благоприятные условия многих и многих прикладных исследований последних лет.

Предисловие

Современное состояние вычислительной математики, компьютерных технологий и электронных средств передачи информации допускает выполнение реальных оперативных и экспертных работ по контролю обстановки на море с использованием достаточно сложных программно-вычислительных комплексов. Актуальной задачей для дальневосточных (сахалинских) оперативных служб является создание автоматизированной системы комплексного наблюдения за сейсмической, гидрофизической, метеорологической и экологической обстановкой в дальневосточных морях России, способной обеспечить своевременный прогноз, и предупредить население и флот об угрозе морских катастроф природного и техногенного характера.

Важнейшим звеном в системе наблюдения за обстановкой на море являются гидродинамические вычислительные эксперименты, позволяющие экстраполировать результаты разрозненных наблюдений за динамикой моря на большие площади морских и прибрежные акваторий.

Наиболее яркой публикацией о методах вычислительной гидромеханики явилась изданная в 1982 году книга О. М. Белоцерковского и Ю. М. Давыдова «*Метод крупных частиц* в газовой динамике» [1982], содержащей наиболее выразительное и точное описание вычислительных экспериментов в гидромеханике с использованием Лагранже-Эйлеровых подходов. В этой же книге выполнен анализ и обоснование физической сути дифференциальных приближений, которые используются в вычислительных моделях гидромеханики при замене классических дифференциальных уравнений в частных производных их конечно-разностными аппроксимациями.

Полученные в данном исследовании тензорные формализации уравнений гидроаэромеханики впервые отрабатывались и проверялись с помощью свертывания к тензорной форме больших систем разностных уравнений метода Крупных частиц.

В 1990 году вышел двухтомник Андерсона Д, Таннхилла Дж и Плетчера Р. «Вычислительная гидромеханика и теплообмен» [1990], в которой были обобщены и систематизированы многие вычислительные модели. В этой книге появился примиряющий термин: «Метод конечного объема», который определяет метод достаточно близкий по смыслу тензорному построению вычислительных экспериментов, но, к сожалению, это справедливо только в отношении постановочной части гидромеханической задачи «метода конечного объема».

Гидродинамические процессы в открытом море и вблизи побережья наиболее полно описаны в классических книгах по океанологии [Березкин, 1947, Бернар Ле Меоте, 1974, Дуванин, 1969, Егоров, 1974, Ламб, 1947, Океанология, 1978, Шокальский, 1959]. В этих же книгах сформулированы Методы моделирования и математические модели длинноволновых процессов в океане и вблизи его побережья сформулированы авторами в строгой форме, и в полной мере использованы в настоящей работе с учетом всех внешних факторов и свойств жидкости, которые оказывают реальной влияние на результаты прямых вычислительных экспериментов.

Всесторонний анализ особенностей аналитического и численного решения указанных уравнений рассматривается в специализированной литературе по составлению математических моделей и численных схем на их основе [Волны ..., 1985, Вычислительный ..., 1989, Вольцингер, 1977, Крылов, 1933, Лаппо Д.Д, 1990, Лаппо С.С., 1979, Марчук, 1983, Рабинович, 1988 и 1993, Роуч, 1980, Самарский, 1980, Стокер, 1959, Хокни, 1987, Храмушин, 1988, Шебалов, 1984,

Шокин, 1985 и 1989, Byung, 1980, Kim, 1992 и др]. В настоящей работе всемерно использовались основные аналитические результаты и математические модели указанных авторов, что было крайне необходимо для достижения внутренней убежденности в корректной работе новых программных комплексов по моделированию длинноволновых процессов в открытом океане и его прибрежной зоне. Особые аналитические и численные трудности и представлялись в акваториях, где глубины моря между смежными расчетными точками могли изменяться в несколько раз, так, к примеру, для дальневосточных морей России в смежных точках глубина может изменяться от единиц метров, сразу до 3-4 тыс. м.

Одной из наиболее сложных проблем, успешно решенных при реализации сложных программных комплексов, явилось обнаружение экспериментального факта, что все внешние силы должны особым образом включаться в расчетных схемах не только в уравнения движения, но и в уравнение неразрывности, и в условия на свободных границах.

Тем не менее, новые математические решения вполне соответствуют методологии построения прямых вычислительных экспериментов, реализуемых непосредственно в процессе построения разностных схем, и изложенных в книгах последних лет, в основном посвященных полным решениям задач аэрогидромеханики и проблемам неильтоновской жидкости [Андерсен, 1990, Артюшков, 1997, Бабкин, 1998, Белоцерковский, 1982 и 1984, Харлоу, 1967]. Но все же основные решения для постановки вычислительных экспериментов были разработаны после сведения всех математических моделей к форме записи в терминах и определениях классического тензорного и векторного анализа [Аквис, 2003, Асторита, 1978, Астахов, 1980, Бэтчелор, 1973, Годунов, 1963, Димитриенко, 2001, Кильчевский, 1954, Кочин, 1963 и 1965, Курбатова, 2002, Лойцян-

ский, 1950, Мак-Коннел, 1963, Милн-Томсон, 1964, Попов, 2002, Седов 1977 и 2004, Файн, 2004, Филин, 1975, Храмушин, 2000, Шуликовский, 1963].

Реализация эффективных вычислительных экспериментов в виде сложных интерактивных программных комплексов невозможна без специальных исследований компьютерных алгоритмов, требующих тщательного анализа и строго следования декларативным и функциональным методам программирования, развитых в 80-е годы прошлого столетия при освоении новых многопользовательских и многопроцессорных вычислительных комплексов. Разной степени противоречивости современное искусство программирования отражено в специальной литературе [Барон, 1980, Вирт, 1985, Майкл Ласло, 1997, Савельев, 1998, Уинстон, 1980].

Проверка новых вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновых процессов в открытом океане и его прибрежной зоне выполнялась в основном по натурным наблюдениям, выполненных непосредственно при участии автора и по результатам экспедиционных обследований последствий цунами на побережье Сахалина и Курильских островов, выполненных в лаборатории цунами ИМГиГ. Однако лабораторные исследования численных моделей и специальные вычислительные эксперименты для сверки с известными аналитическими решениями выполнялась с использованием океанографической литературы и методических материалов гидрометеослужбы [Бернгардт, 1994, Бернштейн, 1992, Гусяков, 1988, Давидан, 1982, Единая ..., 1987, Жуков, 1976, Заварина, 1976, Иванов, 1991, Като, 2001, Лавренов, 1998, Леонов, 1960, Океанология, 1973, Пясковский, 1982, Рекомендации ..., 1997, Симонов, 1990, Справочник .., 1968, Таблицы .., 1960, Триккер, 1969, Шевченко, 1994, Щетников, 1990].

Важное значение в выполненных работах имеют разработки специального измерительного оборудования и реализация новых методик для регистрации длинноволновых процессов с борта морских судов Сахалинского дивизиона Гидрографической службы России, выполненных автором в ходе экспедиционных работ последних лет. Судовые наблюдения позволяют проводить измерения параметров морского волнения в довольно широком спектре, начиная от нескольких секунд, соответствующих периодам свободной качки корпуса, и до сотен минут, в которые судно заведомо удерживает постоянный ход и курс [Благовещенский, 1954, Извещения ..., 1999, Использование ..., 2001, Джилмер, 1984, История..., 2004, Павленко, 1953, Триkker, 1969, Холодилин, 1972, Храмушин, 2003].

В основных целях исследований был поставлен вопрос об обеспечении безопасности мореплавания в широком смысле, включающем как оперативные штормовые предупреждения мореплавателям, так и инженерное обследование волнового режима в портовых акваториях, необходимого для выработки штормовых рекомендаций капитану порта, и создания проектных предпосылок по улучшению волнового режима, оптимальному строительству новых причалов и дамб [Исследование.., 2004, Пути создания.., Груздев, 1999, Дерюгин, 1968, Зубов, 1954, Гусев, 2001].

Таким образом, основным результатом исследований стала разработка научных рекомендаций и оптимальных схем построения комплексной системы наблюдения за состоянием моря, учитывающей необходимость использования современного телеметрического оборудования для наблюдения за состоянием моря на побережье, на автоматизированных гидрометеостанциях морских судов, объединяемых в общий информационный комплекс с помощью прямых вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновых гидродинамических процессов. Объединенный информационный

комплекс может быть с высокой степенью эффективности задействован в подготовке оперативных прогнозов развития опасных морских явлений, в том числе с использованием текущей гидрометеоинформации и данных о подводных землетрясениях, что позволит своевременно прогнозировать потенциально опасные морские наводнения и цунами вблизи побережья, готовить обоснованные штормовые предупреждения для морских портов и судов, находящихся в открытом море [Иванов, 1991, Маклаков, 1976, Никифоров, 1989, Оперативный, 1997, Особо опасные..., 1973, Полякова, 1988, Поплавский, 1988, Прогнозы..., 1986, Соловьев, 1968, Суховей, 1986, Шикотанское цунами.., 1996].

Глава 1. Автоматизированные системы контроля морских акваторий и методы прогноза опасных морских явлений

Актуальной задачей для дальневосточных (сахалинских) оперативных служб является создание комплексной системы наблюдения за сейсмической, гидрофизической, метеорологической и экологической обстановкой в дальневосточных морях России. Это необходимо также и для выполнения прогнозов и предупреждений населения и флота в случае чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, основывающихся на гидродинамических вычислительных экспериментах, та и на оперативном поступлении информации о текущем состоянии моря по телеметрическим каналам сбора данных от действующих постов наблюдения.

Центральным звеном системы контроля морских акваторий должна быть единая информационная система о состоянии моря, позволяющая уточнять или прогнозировать развитие гидродинамических процессов с помощью прямых вычислительных экспериментов. Является телеметрическая измерительная сеть, В систему должны быть включены как действующие посты наблюдения, так и новые автономные прибрежные, судовые и автоматические станции открытого моря.

При оперативном анализе информации, непрерывно поступающей по телеметрическим каналам связи, могут, также, использоваться данные от других систем наблюдения, к примеру, материалы дистанционного зондирования Земли, но все эти разрозненные во времени и пространстве данные должны увязываться с помощью единой модели состояния моря и атмосферы, построенной на основе непрерывного численного моделирования гидрофизических процессов в морских акваториях.

1.1. Опасные морские явления и их воздействие на морские инженерные сооружения

Производственная деятельность ряда отраслей народного хозяйства в значительной мере зависит от состояния моря. Опасные гидрологические явления могут вызвать нарушение деятельности отдельных отраслей народного хозяйства и нанести серьезный ущерб.

На морях и океанах к опасным и особо опасным гидрологическим явлениям относятся:

- 1) исключительно высокие подъемы уровня моря при нагонах и исключительно низкие падения уровня при сгонах;
- 2) исключительно сильное волнение моря – большие накаты, прибой, взбросы, - опасные для мореплавания, ведения промысла и морских инженерных сооружений;
- 3) тропические циклоны (тайфуны, ураганы) при скорости ветра 29 м/с и более;
- 4) экстремальные прибрежные течения, тягуны в портах и др.

Ветровое волнение на море

Особо опасным считается волнение, при котором высоты волн в открытом море достигают 8 м и более.

На Сахалине за критическую высоту для различных районов приняты следующие высоты:

- Татарский пролив	- 4 м и более
- залив Анива	- 4 м и более
- залив Терпения (исключая м. Терпения)	- 4 м и более
- восточное побережье Сахалина	- 6 м и более
- Сахалинский залив	- 6 м и более
- Курильские острова	- 6 м и более
- м. Крильон, м. Терпения	- 6 м и более.

Наибольшая повторяемость штормового волнения приходится на осенне-зимний период – с сентября по март. Осенью наиболее частые и продолжительные штормы связаны с прохождением глубоких циклонов через Охотское море на северо-восток. В зимний период развитию сильного волнения способствуют устойчивые северо-западные и северо-восточные ветровые потоки над морем.

Трехмерное штормовое волнение и воздействие трохоидальных волн на инженерные сооружения до настоящего времени представляются сложнейшими физическими задачами. Практические решения обычно сводятся к экспериментальным оценкам процессов штормового взаимодействия атмосферы и океана, к обобщенным выводам о трансформации морских волн вблизи побережья.

Морское волнение и поверхностные течения являются опасными для мореплавания природными явлениями. В прибрежной зоне штормовая опасность усугубляется зарождающимися длинноволновыми колебаниями уровня моря и экстремальными течениями. При сложении неблагоприятных гидродинамических процессов, судоходство вблизи побережья или проход судов через узкости и ворота морских портов может представлять опасность даже при относительно спокойной погоде.

Изменение уровня моря и штормовой нагон

Наиболее частыми причинами экстремальных колебаний уровня моря являются: ветровой нагон и сгон, неравномерное распределение атмосферного давления над морем, складывающиеся с периодическими приливообразующими силами Луны и Солнца.

Данные о реальном уровне моря необходимы мореплавателям, проходящим по мелководным проливам и прибрежным отмелям. Эти сведения важны для портового хозяйства и гидротехнического стро-

ительства; положение уровня моря определяет высоту портовых сооружений или объем дноуглубительных работ на фарватерах.

Обычно, если берег крут и приглуб, то экстремальные колебания уровня моря невелики и не могут угрожать затоплением возвышенной суши. На пологих отмелых берегах, в устьях и эстуариях рек нагон воды нередко приводит к опасным и катастрофическим наводнениям, и особенно при сложении с накатом длинноволновой зыби на подъеме приливного уровня воды вблизи побережья.

Нагонные подъемы уровня на побережье Охотского моря и Татарского пролива отмечаются в течение всего года, но в летний период они, как правило, невелики. Наибольшие величины и повторяемость нагонных колебаний уровня отмечаются в сентябре-декабре, что связано с особенностями синоптических процессов над Сахалинской областью, находящейся в этот период под воздействием тайфунов и глубоких циклонов. Смещение этих барических образований на сахалинскую область происходит в основном по трем направлениям:

- с Японского моря через Сахалин в Охотское море;
- вдоль Курильских островов;
- от Приморья или Хабаровского края через Сахалин в Охотское море.

Циклоны первого и второго типа возникают в центральной и южной частях Японского моря, в Желтом море или в Тихом океане. Эти циклоны более глубокие, чем циклоны третьего типа, возникающие на континенте. Прохождение глубоких циклонов сопровождается штормовыми и ураганными ветрами, резким изменением давления, которые вызывают на море сильное волнение и подъем уровня. Кроме этих факторов значительный эффект в развитие сгонно-нагонных колебаний привносят размеры и конфигурация заливов (бухт), их расположение относительно действующих ветров.

В Татарском проливе, у юго-западного побережья Сахалина (Невельск, Холмск), даже при продолжительных ветрах западного и северо-западного направления, силой до 30-40 м/с, высоты нагона не превышали 70 см, что объясняется близостью глубоководных акваторий Японского моря. *На севере Татарского пролива, вблизи порта Александровск-Сахалинский, штормовые нагоны большой высоты происходят регулярно, практически при каждом шторме на море.*

В тех случаях, когда значительные нагоны приходится на высокую полную воду, уровень может превысить критическую отметку, что всегда вызывает затопление народнохозяйственных объектов, расположенных в прибрежной зоне. Зачастую сочетание нагонного подъема уровня со штормовым волнением приводит к затоплению низменных участков берега, создает подпор в устьях рек и вызывает затопление пойменных участков, даже в тех случаях, когда уровень не достигает критической отметки.

Сейши и тягун в портах

Короткопериодные сейши в портах создают сильные периодические течения, способные сорвать корабли со швартовов. Это явление называется тягуном. Явление тягуна отмечается в портах Холмск и Корсаков, в других портах и портопунктах.

Интенсивность явления, при отсутствии инструментальных наблюдений обычно определяется по поведению судов:

- *слабый* – горизонтальные движения судна менее 1 м, высота длиннопериодных волн не превышает 10 см;
- *средний* – движения судна равны 1-2 м, высота волн 10-20 см;
- *сильный* – движения судна 2-4 м, высота волн 20-40 см;
- *очень сильный* – движения судна > 4 м, высота волн > 40 см.

Анализ случаев тягуна позволил выделить характерную барическая ситуацию, предшествующую этому явлению. Так, в Корсаковском порту тягун возникает после прохождения над Японским и Охотским морями глубоких малоподвижных циклонов, обуславливающих штормовую обстановку в этих районах. Направление воздушного потока может быть различным, но продолжительность потока одного направления должна быть от 24 часов и более.

На акватории порта Холмск тягун возникает при следующей синоптической обстановке:

- при смещении глубоких циклонов с северной части Японского моря, через южные районы Сахалина в юго-западную часть Охотского моря, обуславливающих штормовую деятельность в Японском море и Татарском проливе. В этих случаях возникновению тягуна предшествует продолжительный ветер восточных румбов;

- при стационировании в Охотском море глубоких циклонов, когда над Татарским проливом в течение суток и более действует ветер северных румбов, развивающий волнение с высотой волн до 3-5 м, которое затем переходит в зыбь.

Морские гидрологические прогнозы

При анализе временного и пространственного изменений физических явлений в море необходимо учитывать, что океан и атмосфера находятся в постоянном динамическом взаимодействии. Поэтому изучение и прогнозирование физических явлений в море нельзя отрывать от изучения процессов, происходящих в атмосфере.

Морские прогнозы различаются по содержанию, заблаговременности, географическим объектам, методам составления, характеру составления и по форме выпуска.

По содержанию все прогнозы можно разделить на две группы: прогнозы гидрологических явлений, характеризующих динами-

ские процессы в море, и прогнозы гидрологических явлений, характеризующих тепловые процессы в море. К первой группе можно отнести прогнозы волнения, течений, сгонно-нагонных колебаний уровня моря, дрейфа льда и так далее, ко второй – прогнозы температуры воды (по площади и по вертикали) и ледовых явлений.

Все прогнозы могут составляться для различных географических объектов: для отдельных прибрежных пунктов, территорий портов, отдельных районов морей и для моря в целом.

По заблаговременности морские прогнозы подразделяются на краткосрочные (*несколько часов*), периодные (*от 1 до 15 сут.*), долгосрочные (*от 15 сут. до 4 мес.*) и сверхдолгосрочные (*на 4 мес. и более*).

В настоящей работе рассматриваются только краткосрочные прогнозы. К ним относятся сгонно-нагонных колебания уровня моря, опасные и особо опасные явлений (тягун, цунами).

Реальные возможности повышения качества морских краткосрочных прогнозов и увеличения экономического эффекта от их использования заключается не столько в увеличении количества постов наблюдения за состоянием моря, а в скорейшем задействовании в практике морских служб современных вычислительных экспериментов по моделированию гидродинамических процессов и взаимодействия атмосферы и океана, адаптированных как к регламенту работы морских служб, так и к непрерывно поступающей информации от морских измерительных систем и систем дистанционного мониторинга поверхности моря и атмосферы.

В работе представляются результаты исследований гидродинамических моделей на основе длинных волн в полных потоках. Эта вычислительная и алгоритмическая модель охватывает задачи моделирования приливного режима, штормовых нагонов, цунами и других опасных морских явлений.

Сводные гидрометеорологические характеристики района исследований

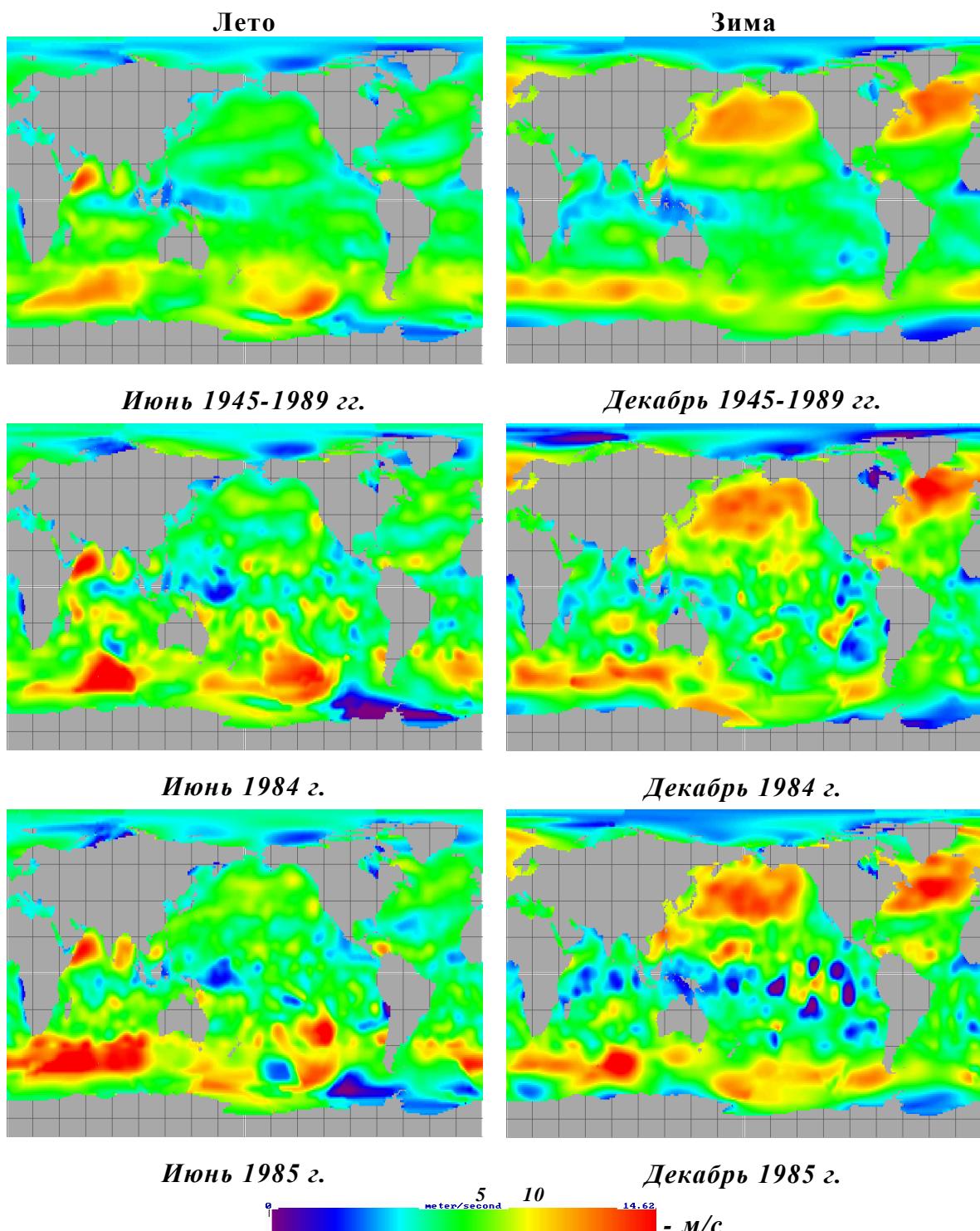


Рис.1.1. Характерные карты штормовых ветров Мирового океана для летних и зимних месяцев. Верхние два рисунка дают осредненные оценки ветров за 45-летний период, а пары нижних - характер изменчивости среднемесячных величин ветров на примерах 1984 и 1985 годов.

Таблица 1.
Годовые климатические характеристики

Порты	ГМС	Температура воздуха		
		Среднее	Ср./абс макс.	Ср./абс. мин.
Кайган	Пограничное	-1,8	3,3/35	-6,4/-39
	м. Терпения	-0,1	2,5/26	-2,3/-28
Поронайск		0,1	4,4/36	-4,0/-40
Вахрушев	Макаров	1,6	5,5/33	-2,2/-32
Охотское	Стародубское	2,0	6,4/34	-1,9/-34
Корсаков		3,0	7,0/30	-0,6/-33
Невельск		4,3	7,5/30	1,2/-25
Холмск		3,9	7,3/30	0,6/-25
Пензенское	Ильинский	2,4	5,8/29	-1,0/-34
Александровск		0,3	4,6/31	-3,7/-41

Таблица 2.
Скорость ветра

Порты	ГМС	Данные наблюдений		Расчетные скорости (м/с)	
		Средняя за год	Число дней > 15 м/с	1 раз в год	1 раз в 20 лет
Кайган	Пограничное	2,6	10	21	28
	м. Терпения	6,7	83	37	50
Поронайск		3,6	13	21	28
Вахрушев	Макаров	3,2	21	23	32
Охотское	Стародубское	5,6	43	22	33
Корсаков		4,5	27	29*	39*
Невельск		6,3	65		
Холмск		6,0	131		
Пензенское	Ильинский	5,1	40		
Александровск		4,7	45		

*- расчет по данным ГМС Южное

Таблица 3.
Средняя в течение года продолжительность опасных явлений

Порты	ГМС	Метели		Грозы		Туманы	
		Число дней	Продолжительность (часы)	Число дней	Продолжительность (часы)	Число дней	Продолжительность (часы)
Кайган	Пограничное	23	8,4	3	1,6	55	7,6
	м. Терпения	41	8,4	1	1,4	116	11,5
Поронайск		19	8,5	3	1,4	67	5,7
Вахрушев	Макаров	29	8,3	4	1,2	42	5,5
Охотское	Стародубское	49	7,9	4	1,3	51	5,4
Корсаков		33	7,3	5	0,9	39	44,4
Невельск		64	9,9	5	1,2	43	8,2
Холмск		69	10,6	5	1,3	34	4,5
Пензенское	Ильинский	50	9,5	4	1,2	38	6,5
Александровск		47	9,2	6	1,5	24	3,8

Таблица 4.
Волнение и лед по материалам наблюдений

Порты	ГМС	Волнение		Ледовый режим	
		Макс. величина (м)	Направление подхода	Ранняя дата появления	Поздняя дата очищения
Кайган	Пограничное	7	C	16.XI	24.Y
	м. Терпения	8	СВ	23.XI	27.YI
Поронайск		6	ЮВ	12.XI	14.Y
Вахрушев	Макаров	8	СВ	20.XI	8.YI
Охотское	Стародубское	6	СВ	24.XI	18.YI
Корсаков		4.5	ЮВ	8.XI	4.Y
Невельск		5	Ю-ЮЗ	24.XII	22.IY
Холмск		8	С3	8.XII	30.III
Пензенское	Ильинский	9	Ю	15.XI	31.III
Александровск		8	С3	9.XI	14.Y

Таблица 5.
Морские опасные явления

Порты ГМС	Нагоны					Тягун Число за 1956 1971гг
	Период	Величина	Общее число	Из них >50	Период проявления	
Поронайск	1954-71	25-80	10	6	X-XII	
Охотское Стародубское	1951-70	20-100	22	15	IX-XII	
Корсаков	1952-70	20-60	22	4	IX-XII	138
Невельск	1954-71	25-70	20	10	IX-I	
Холмск	1954-71	20-60	17	3	IX-XII,V	14

1.2. Гидродинамические особенности проявления длинноволновой динамики моря вблизи побережья.

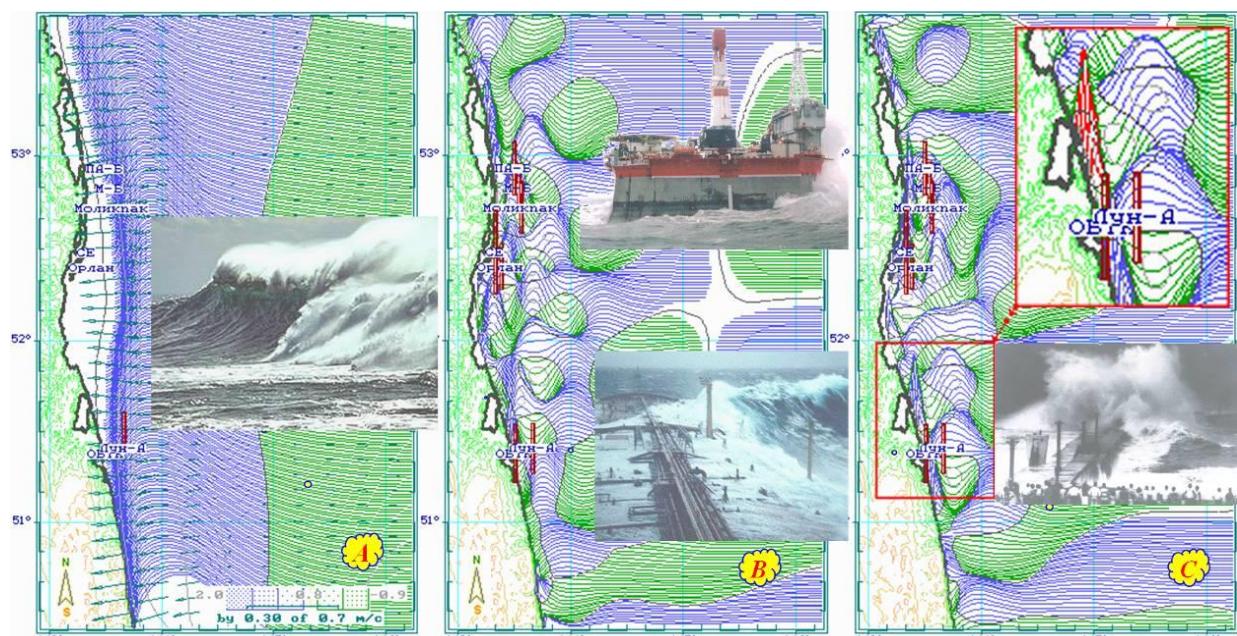


Рис.1.2. Сахалинский шельф. Три типовых варианта трансформации длинных волн вблизи морского побережья. А – обрушение фронта первого вступления волны вблизи побережья, характерное для цунами; В – установившиеся колебания уровня моря под воздействием штормов или морской зыби, идущей из удаленных морских акваторий; С – обрушение длиннопериодной морской волны на побережье, вблизи которого отсутствуют или временно нарушаются условия для поддержания стационарности длинноволновых процессов на изобатах от 25 до 40 м.

В основе анализа особенностей проявления волн цунами и морских наводнений у конкретных участков морского побережья

может быть использовано разделение процессов воздействия длинных волн на побережье по этапам прохождения первых волн цунами и последующего возбуждения шельфовых акваторий (рис. 2.20), зависящих от геометрических особенностей прибрежного рельефа морского дна:

A – Прогрессивная, быстродвижущаяся к берегу волна цунами обрушивается на все побережье крутым фронтом. Отмели в заливе Чайво немного задерживают подход цунами, одновременно фокусируя удар волны на небольшом участке берегового уреза, где волна цунами будет максимально большой высоты и потому наиболее опасной.

B – При длительном длинноволновом воздействии извне, волновая поверхность систематизируется так, что более длинные и потому более высокие волны концентрируются на изобате от 15 до 30 м, а вблизи берегового уреза собираются пространственно короткие волны малой высоты, как бы защищая берег от заплесков и размыва.

C – Однако некоторые участки побережья не всегда поддерживают стационарность общего длинноволнового процесса на шельфе, и словно по волноводам вытягивают волновую энергию на себя, заливая берег штормовыми наводнениями.

Характер воздействия на морское побережье волн цунами заметно отличается от постоянно существующих длинноволновых процессов в прибрежных мелководьях открытого моря, зарождающихся под воздействием метеорологических факторов или вынужденных волновых колебаний, привносимых из удаленных штормовых акваторий.

В результате серии вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновых процессов вблизи побережья выявлено, что при прохождении пакета волн цунами со стороны открытого моря

ря, на маршруте по шельфовым акваториям от границы океанического свала глубин, волны увеличивает свою высоту в среднем в 4-6 раз, в то время как постоянно действующая длиннопериодная зыбь усиливается на этом же участке шельфовой акватории не менее чем в 20-30 раз.

Есть две причины слабого проявления длинноволновой зыби, принципиально отличающие характер ее гидродинамического воздействия на морское побережье от аналогичного воздействия со стороны цунами:

1. Постоянно действующая, и потому стабилизированная вблизи побережья до состояния стоячих волн, длиннопериодная зыбь, получает постоянную энергетическую подкачку со стороны открытого океана. На морской границе шельфовой зоны эти длинные волны имеют высоту не более 2-3 см, в то время как волна цунами может подходить со стороны океана с заметно большей высотой, нередко достигающей метровых величин, что в немалой степени обусловливает столь интенсивное и запоминающееся проявление цунами на побережье;

2. Установившиеся длинноволновые колебания вблизи мелководного побережья, возникающие в результате длительного и равномерно распределенного штормового воздействия, так же как и при непрерывной подкачке энергии в виде длинноволновой зыби из удаленных штормовых акваторий, характеризуются равномерным пространственным распределением волновой энергии. Критерием такой равномерности является сохранение угла волнового склона установившихся длинноволновых колебаний, а так как геометрические размеры длинных волн тем больше, чем глубже акватория, то это объясняет факт исчезающее слабого проявления установившихся колебаний на береговом урезе, где традиционно проводятся мореографные наблюдения.

Из второго вывода также следует, что установившиеся колебания длинноволновой зыби должны иметь максимальную высоту волн на глубинах порядка 15-25 м, как раз в той полосе прибрежной акватории открытого моря, где располагаются гидротехнические сооружения завода сжиженного природного газа (СПГ) и выносные причальные устройства (ВПУ) компании Сахалинская энергия.

Аналогичный эффект ослабления при выходе фронта волны на мелководье практически невозможен, так как в момент первого вступления период волны редко соотносится с собственными колебаниями уровня моря у конкретных участков побережья, и потому первый фронт волны цунами подходит к берегу с постоянным увеличением высоты, вплоть до обрушения гребня волны. Последующие за первым фронтом волны могут попасть в резонанс с собственными длинноволновыми колебаниями на мелководье или внутри заливов. В этом случае цунами сначала задержится на резонирующем участке, а затем обрушится на берег, увеличившись сопоставимо с динамикой длиннопериодной зыби, то есть до 15-20 крат. Такой берег должен быть признан чрезвычайно опасным, так как любое сейсмическое или метео-циunami будет вызывать катастрофически большие наводнения, многократно превышающие средние заплески по окружающему побережью (*бухты Русская и Моржовая на Камчатке*).

Если прибрежная акватория характеризуется монотонным наклоном морского дна, без каких – либо горизонтальных поверхностей и закрытых заливов, то это является условием отсутствия собственных длинноволновых колебаний для такого побережья. Однако, именно такие участки морского дна могут стать своеобразным проводником длинных волн с большой амплитудой непосредственно до побережья, так как такой нерезонирующий «волновод» способен откачивать на себя длинноволновую энергию из близлежащих аква-

торий, и рассеивать ее в виде волн большой амплитуды на побережье (*Большерецк на Камчатке, Ныйский залив, побережье к востоку от мыса Юноны в заливе Анива*).

Не менее катастрофичные последствия будут наблюдаться в случае нарушения стационарности длиннопериодной зыби, что может произойти, например, при быстром изменении штормовых условий в случае перемещения циклона из открытого моря на побережье, или в результате изменения приливного уровня моря. Аналогичные по характеру нестационарности наводнения могут вызываться через определенное время после вступления первого фронта волны цунами, что в пространстве будет наблюдаться как своеобразное перемещение вдоль побережья длинноволнового пакета, последовательно вызывающего наводнения во всех пунктах вдоль побережья на маршруте его перемещения (*Южно-Курильский пролив, порт Корсаков*).

1.3. Исходные физические определения и батиметрическая информация в построении вычислительных экспериментов

Морские волны можно классифицировать по различным признакам.

По силам, вызывающим волновое движение (по происхождению): *ветровые* - находящиеся под воздействием ветра; *корабельные* - создающиеся при движении корабля и тайфуна; *приливные* - возникающие под действием периодических сил притяжения Луны и Солнца; *анемобарические* - связанные с отклонением поверхности океана от равновесия под действием ветра и атмосферного давления; *прибрежные* – сейшевые или захваченные волны, рождающиеся у морского побережья с повышенными резонансными свойствами; *цунами* - возникающие в результате сейсмических процессов в земной

коре. Практически всегда на поверхности открытых морей и океанов наблюдаются зыбь, ветровые и приливные волны.

Для морских акваторий характерными являются периоды волн от 6 до 8 сек, что соответствует длине волны порядка 80 м, максимальной скорости потока в гребне волны - 10 м/с (20 узлов) и экстремальной амплитуде волны порядка 10 м. В открытом океане период волн может достигать 15 и более сек, но только для волн зыби, имеющих относительно малую амплитуду, обычно без обрушающихся гребней. На побережье открытого океана, при прохождении штормов, нередко наблюдаются волны прибойной зыби с периодами порядка 11-13 сек, высота которых существенно выше, чем у волн открытого моря. Именно поэтому плавание вблизи побережья или над морскими отмелями всегда представляет повышенную опасность для мореплавателей.

Интенсивное штормовое волнение возникает на шельфовых и прибрежных мелководьях, когда длинная морская зыбь, во взаимодействии с морским дном, начинает регуляризоваться, накапливая энергию в своеобразных единенных волнах. В этом случае особо крупные волны-убийцы будут не стоячими, а быстров движущимися, что делает их чрезвычайно опасными как для судов, находящихся в море, так и для морских и прибрежных инженерных сооружений. Последнее особенно важно учитывать для обеспечения безопасности штормового плавания рыбопромыслового флота, который чаще всего ведет промысел рыбы на банках и в мелководных морских акваториях, потенциально подверженных волнам-убийцам.

Можно ввести классификацию волновых движений в открытом море, [Лаппо, 1990] различающую трехмерное волны глубокой воды, образующих групповые энергетические структуры в виде пакетов поперечных волн Герстнера, и формально одиночных прогрессивных морских волн, способных аккумулировать энергию штормо-

вого волнения в форме длинноволновых солитонов, пронизывающих всю толщу воды от поверхности до морского дна:

$D > \lambda/2$ – короткие волны глубокого моря, имеющие поперечный характер волновых движений.

$D \approx \lambda/2$ – волны конечной глубины с ярко выраженными признаками мелководной трансформации, в результате которой крупные девятые валы теряют свойство стоячих волн;

$D < \lambda/2$ – штормовое волнение интенсивно трансформируется в прибрежные длинные волны, имеющие продольный характер волновых движений и пронизывающих всю толщу воды.

По наблюдениям за волнением на акватории Холмского морского торгового порта, в штормовую погоду там обычно наблюдаются волны с длиной не менее 50-60 м и периодом порядка 5-6 с, которые имеют чисто длинноволновой характер. При этом в открытом море и в воротах порта преобладающим периодом крупных штормовых волн отмечается 11-12 с. Последнее наглядно показывает очень сложный характер трансформации штормовых волн на мелководье, одновременно подтверждая неординарность проектных решений по гидротехнической защите акватории порта от штормовых волн.

Волны глубокой воды не могут существовать на мелководье, где они становятся неустойчивыми и опрокидываются [Дуванин, 1968]. Предельные деформации волн и последующее опрокидывание гребней, типичное для прибойной зоны, начинается с глубины $D = 1.3 \eta_{\max}$, где: η_{\max} – высота гребня волны. Соответственно, штормовая волна, имеющая характерный для Охотского моря период порядка 8 с; длиной 100 м и предельной амплитудой, достигающей 12 м, потеряет свою устойчивость и начнет разрушаться на глубинах порядка 16 м.

При движении морской волны в промежуточных режимах, когда на динамику волны влияет глубина моря, кинематические характеристики гравитационных волн могут быть оценены следующей зависимостью: $\tau^2 = \frac{2\pi \cdot \lambda}{g \cdot \operatorname{th} \frac{2\pi \cdot D}{\lambda}}$.

Необходимо обратить внимание, что при глубине моря 50 м. период 100 метровой волны Охотского моря практически не изменяется. На глубинах порядка 10 м, эта волна увеличивает свой период всего лишь до 10 с, и затем наблюдается в виде прибоя на побережье с периодом порядка 11-12 с, подтверждая тем самым, что полная трансформации волн Герстнера в длинные волны на мелкой воде происходит на глубинах порядка 9 м.

Однако, для глубокой воды период волн 11-12 с соответствует длине волны порядка 200 м., что в случае прибрежных мелководий с глубинами 50-100 м., приведет к интерференции с усиленными и отраженными от берега длинными волнами, порождая волны убийцы.

Гидродинамические вычислительные эксперименты

Классифицируем вычислительные эксперименты и связанное с ними математическое обеспечение по уровням сложности. Это позволит сформулировать основные правила и допуски на использование новых программных комплексов в действующих морских службах:

1. Исследовательское математическое обеспечение, к которому относятся все представленные в данной работе программы, предназначено для моделирования длинноволновых процессов в открытом океане и его прибрежной зоне, с последующей интерпретацией результатов исследований.

2. В процессе эксплуатации исследовательского математического обеспечения, пользовательские интерфейсы программ могут быть доведены до уровня автоматизированных рабочих мест инженеров-океанологов, которые в будущем превратятся в инструментарий для автоматизированной обработки океанологических материалов.

3. При использовании новых программ в условиях реальной океанологической практики, вычислительные эксперименты могут быть адаптированы к реальной гидрофизической обстановке в дальневосточных морях России, а алгоритмы обработки оперативных данных будут formalизованы в автоматизированные информационно-аналитические системы, которые могут быть использованы в единой системе контроля обстановки на море.

Вычислительные модели и методики обработки океанографической информации разрабатывались с учетом необходимости их использования в действующих оперативных службах, ведущих наблюдение за состоянием моря. С той целью в программных комплексах предусмотрена возможность анализа практической применимости математических моделей для конкретных батиметрических карт, а также отдано предпочтение только высокоскоростным методам вычислений. Дополнительные гидрофизические факторы, могут быть включены только с помощью специальных настроек программного комплекса, выполняемых, правда, непосредственно в процессе проведения вычислительных экспериментов. К таким факторам относится сферичность и вращение Земли, притяжение Луны и Солнца, учет внешних возмущений, придонное трение, перепады атмосферного давления и приводный ветер и др.

Прямые вычислительные эксперименты требуют больших вычислительных ресурсов и позволяют получать результаты после проведения длительных по времени расчетов. Тем не менее, всегда

можно подобрать исходные данные таким образом, чтобы моделируемые процессы протекали быстрее, чем реальные морские явления, обеспечивая тем самым решение прогностических задач [Пясковский, Померанец, 1982; Поплавский, Храмушин и др, 1997; Красный, Храмушин и др, 1998; Лаппо, 1979; Прогнозы..., 1986].

Батиметрические архивы для построения длинноволновых вычислительных экспериментов

Современный гидрофизический и экологический мониторинг морских акваторий должен осуществляться в комплексе с выполнением прямых вычислительных экспериментов по моделированию гидродинамических процессов и взаимодействия атмосферы и океана как на всей акватории Охотского моря и прилегающих участках Тихого океана, так и на прилегающих к сахалинскому шельфу мелководных участках нефтепромысловых акваторий.

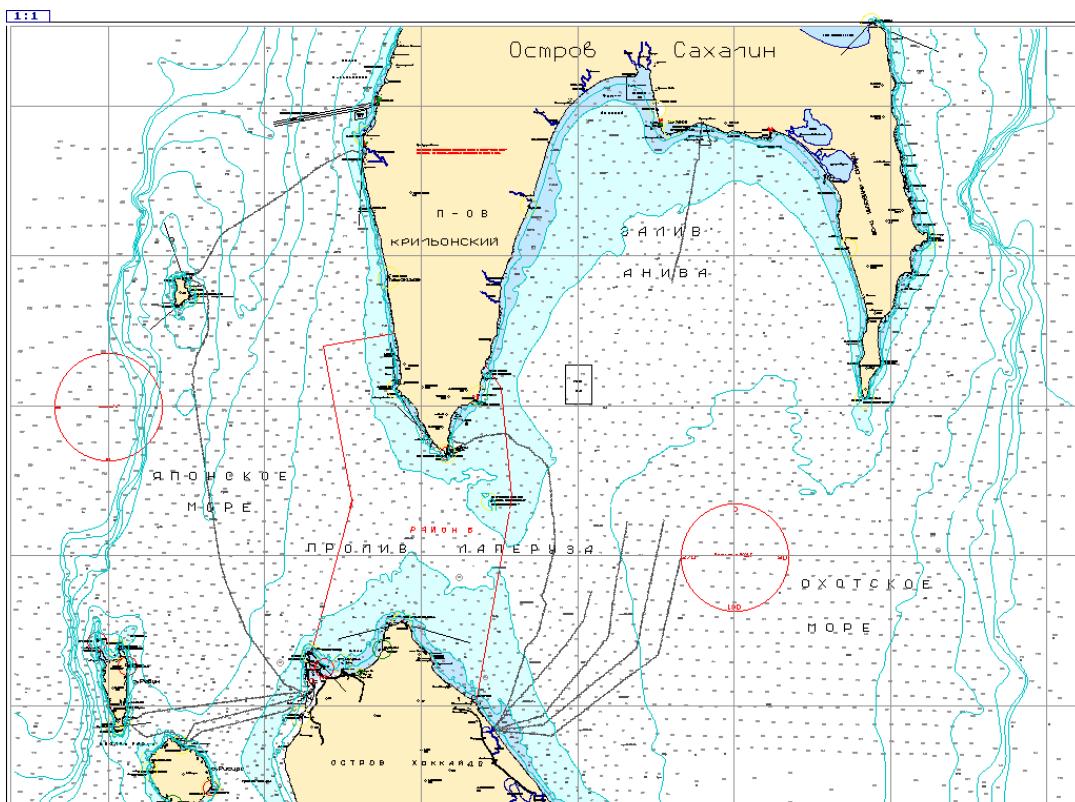


Рис. 1.3. Пример морской навигационной карты Главного управления по навигации и океанографии Гидрографической службы ВМФ России, оцифрованной

в векторном и матричном форматах и используемой при подготовке цифровой батиметрии для постановки прямых гидродинамических вычислительных экспериментов.

Для реализации таких вычислительных экспериментов необходимо создание специальных цифровых батиметрических архивов, охватывающих акватории открытого моря и прибрежные акватории повышенной точности. Для проведения сквозного моделирования гидродинамических процессов в этих акваториях, необходимо обеспечение достаточно большого перехлеста разномасштабных батиметрических карт, что даст возможность переноса расчетов с глубоководных морских регионов на прибрежные и обратно.

Архив батиметрических и топографических материалов, который готовился в течение последних 20 лет, образован множеством небольших по объему цифровых массивов, охватывающих различные по площади участки Японского и Охотского морей и прилегающих акваторий Тихого океана. Технология оцифровки предусматривала нанесение сетки (рис. 1.2), в узлах которой производится интерполяция глубин, с последующим переносом чисел в таблицы на бумажных листах, и перенабором их в текстовом редакторе на компьютере.

Создание уточненного батиметрического массива по Охотскому морю и прилегающим акваториям

Отсутствие цифровых батиметрических моделей по российским дальневосточным акваториям обосновало актуальность оцифровки разномасштабных батиметрических карт по всем морям, прилегающим к Дальнему Востоку России. В настоящее время оцифрованы новые батиметрические массивы по Охотскому морю, северной части Японского моря и прилегающей к Курильским островам акватории Тихого океана. Эти массивы создавались с использованием специального программного комплекса «Three», который позволил

объединить новые оцифровки с существующим архивом батиметрической информации, а также с доступными данными по рельефу Земного шара из мировых центров данных.

Для создания цифровой модели рельефа Охотского моря использованы батиметрические материалы лаборатории геоморфологии Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН. Батиметрические карты в меркаторской проекции были представлены на 51 листе, каждый из которых покрывал прямоугольную область размером 2° по широте и 3° по долготе, с отображением рельефа изобатами через каждые 10 м.

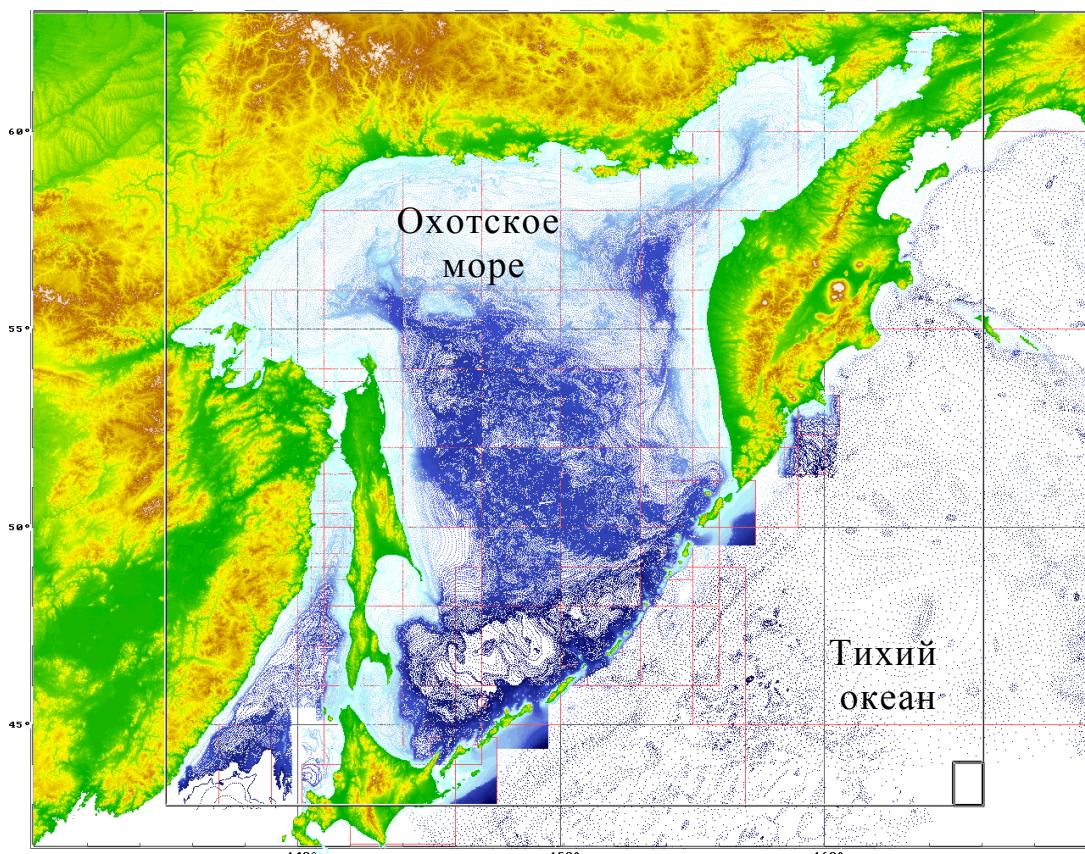


Рис. 1.4. Географический район Охотского моря и прилегающих акваторий, по которому проводилась оцифровка батиметрических карт и подготовка цифровой модели рельефа морского дна, объединенного с топографией прибрежных территорий.

Акватория Японского моря оцифровывалась по навигационным картам в масштабах 1:250 000 и 1:500 000. С карт снимались все нанесенные на них промеры глубин и изобаты, а на тех участках, где

для восстановления рельефа данных не хватало, дорисовывались промежуточные изобаты, которые также оцифровывались.

Итоговый массив имеет следующие характеристики:

- Проекция: **географическая;**
 Имя основного файла: **Охотск.dat**
 Шаг сетки: **15"** (угловых секунд, 2.5 кабельтова);
 Размерность матрицы: **4801** точек по широте и **7441** – по долготе;
 Граничные координаты: **43° ÷ 63° С.Ш., 145° ÷ 166° В.Д.**
 Размер области **20°** по широте и **21°** по долготе;
 Максимальная глубина моря: **3399.7 м.**
 Максимальная высота рельефа суши: **1498.4 м.**
 Координатные привязки выполнены в узлах сетки. Общий объем основного файла данных: **142 896 964** (35 724 241 чисел).
 Дополнительно подготовлены батиметрические файлы с большим шагом сетки:
Охотск-H.dat шаг: 30", размерность: 2401 x 3721 точек;
Охотск-M.dat шаг: 1', размерность: 1201 x 1861 точек.

Батиметрические массивы из Мировых центров данных

Наилучшим из доступных моделей рельефа Земного шара можно назвать цифровой массив «TerrainBase» (рис. 1.4), опубликованный в 1995 г. в мировом центре геофизических данных в Болдере в США (National Geophysical Data Center, 325 Broadway, E/GC1, Boulder, Colorado 80303 USA). Информацию об этом цифровом рельефе можно найти в сети интернет по адресу: ngdc.noaa.gov, а сам батиметрический массив расположен на: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov>.

К недостаткам массива “Terrain-Base” относится не только слишком грубая сетка оцифровки, составляющая по меридиану 5 морских миль, но также и заметные погрешности в задании глубины

моря в акваториях, прилегающих к дальневосточному побережью России в Охотском и Японском морях.

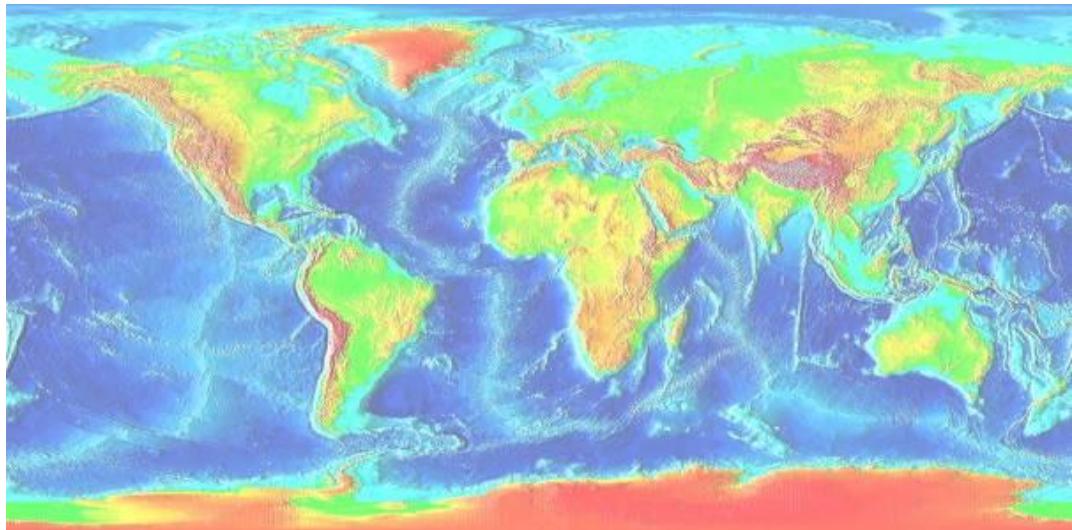


Рис. 1.5. Рельеф «TerrainBase» с шагом сетки 5 угловых минут, мирового центра геофизических данных (WDC-A) в Болдере (США)

В апреле 2000 года в Университете Калифорния (Сан-Диего, США) по данным спутниковых альtimетрических съемок и морских эхолотов промеров («*Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings*»), была подготовлена меркаторская батиметрическая модель мирового океана (версия 8.2) с шагом сетки 2 морских мили. Авторы Вальтер Смит и Давид Сандвелл (©97, *Walter H.F.Smith and David T.Sandwell*). Институт Геофизики и планетарной физики Университета Калифорния представляет этот проект по адресу: <http://topex.ucsd.edu>, где есть ссылка на файловый архив: <ftp://topex.ucsd.edu>. Однако, качество указанной батиметрической оцифровки в акваториях вблизи российского побережья совершенно недостаточно, ошибки в определениях глубин очень велики.

Данные по наземным территориям опубликованы в Геологической службе США: <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html>. Это высококачественная модель земного шара в географической проекции с шагом сетки 30 угловых секунд. Работа выполнена по проекту

создания Глобальной цифровой модели рельефа (Global Digital Elevation Model, DEM), и в настоящее время очень широко используется при проведении гидрологических, экологических исследований на суше, а также при решении многих задач радиосвязи и др.

1.4. Комплексное использование вычислительных экспериментов, мореографических и экспедиционных наблюдений

Дальневосточные моря отличаются высокой штормовой активностью, частыми туманами и тяжелыми ледовыми условиями в зимние навигационные сезоны. Дальневосточные моряки хорошо знакомы с ураганными ветрами над морем, с гигантскими волнами зыби и экстремальными течениями вблизи прибрежных скал. Отсутствие защищенных от штормов заливов и гаваней, малая заселенность побережья и низкая активность мореходства в этом районе имеют следствием неразвитость навигационно-гидрографического обустройства морских акваторий, отчего море несет большие опасности как для мореплавателей, так и для населения на побережье Дальнего Востока России в целом.

Современная морская измерительная техника, вычислительные и информационные возможности бортовых компьютеров могут предложить капитанам морских судов обоснованные решения и оптимальные варианты судовождения в сложных или экстремальных условиях плавания. Корабельный вариант метеостанции может составить основу универсальной бортовой аппаратуры для автоматического определения состояния моря, атмосферы и динамики их взаимодействия с движущимся кораблем (*характер морского волнения определяется по бортовой, килевой и вертикальной качке корабля*).

Автоматически сформированный пакет гидрометеорологических данных, дополненный прогнозными оценками условий плавания из береговых морских служб, вместе с данными о текущем состоянии судна может быть доставлен в автоматическом режиме на береговые метеоцентры, а также востребованы судоводителем для решения навигационных задач; для повышения эффективности и безопасности штормовой эксплуатации корабля.

Контроль длинноволновых процессов в Японском море на Холмском метеографе

В Холмском порту на базе стандартного метеографа впервые в России был введен в оперативное использование телеметрический измерительный комплекс наблюдения за уровнем моря, температурой воды и воздуха, который успешно отработал чуть более шести месяцев (рис. 1.5). На этот период Холмский морской торговый порт был объявлен сахалинским научно-исследовательским полигоном для изучения опасных морских явлений и полевых испытаний новых телеметрических систем оперативного контроля состояния морских акваторий.

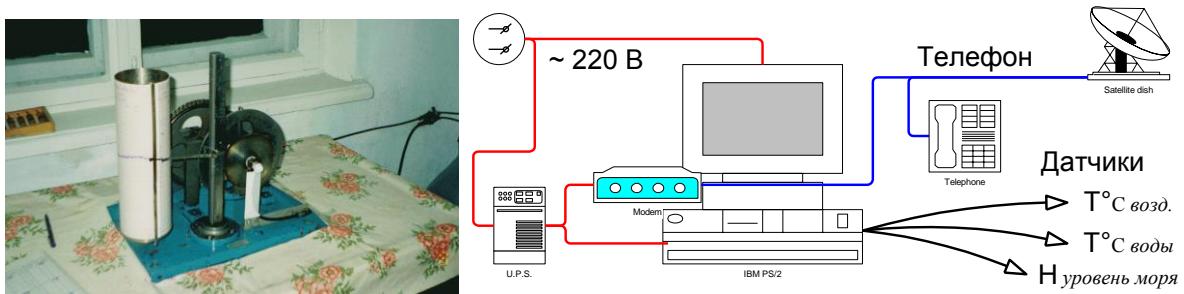


Рис. 1.6. Потенциометрический датчик, закрепленный на оси Холмского метеографа, выполняет ежесекундное считывание данных об уровне моря, с последующим осреднением их до минутной дискретности. Линия связи активизируется ежечасно, пакет передаваемых данных дополняется осредненными и экстремальными значениями температур воды и воздуха, и отправляется по каналам электронной почты в Сахалинский региональный центр цунами

Позже были проведены наблюдения за динамикой морских вод на шельфе и на подходах к Холмскому порту. Совместный анализ результатов вычислительных экспериментов и натурных наблюдений позволил сделать любопытные выводы о проектировании геометрии морских портов и об использовании их акватории для оперативных прогнозов опасных морских наводнений, в том числе на близлежащих и удаленных участках сахалинского побережья.

Так как у побережья Холмского порта есть быстрый спад глубин в сторону вершины глубоководного желоба, то его можно считать хорошо защищенным от неожиданных ударов длинных волн типа цунами. Подъемы уровня воды, наблюдавшиеся в порту в штормовую погоду, вполне соответствовали по длительности времени прохождения циклонов, и также не выявили опасных гидродинамических процессов на акватории Холмского порта.

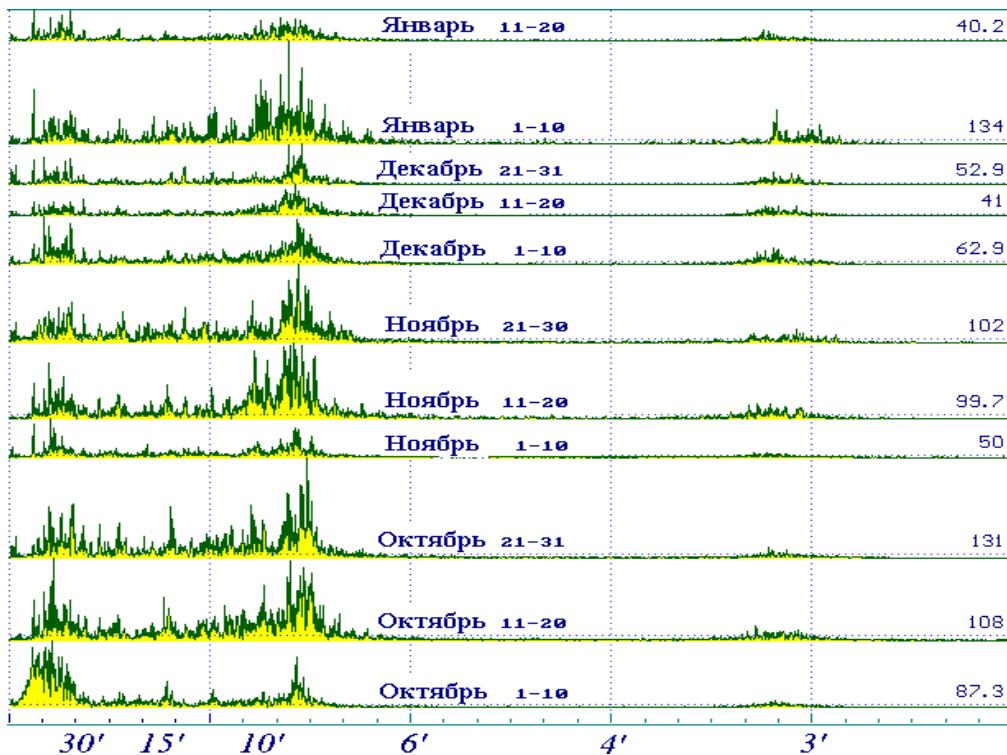


Рис. 1.7. Спектральные оценки колебаний уровня моря, регистрируемых Холмским метеографом. На нижней шкале отмечены периоды длинных волн, на вертикальной шкале справа приведен максимум спектральной оценки длинноволновой энергии за десятидневный период наблюдений за уровнем моря.

Довольно интенсивная волна с периодом около 5 минут, выявленная в результате вычислительных экспериментов только в районе Холмского порта и присутствующая в наблюдениях с борта экспедиционного судна (Рис.1.13), ни разу не наблюдалась в записях Холмского метеографа (рис. 1.22), что также подтверждает защищенность порта от внешних воздействий с периодами волн менее 7-8 минут.

Последний вывод несколько ухудшает условия использования метеографа в качестве поста для оперативного контроля состояния Японского моря в целом. Однако, для длинноволновых процессов с периодами 8 и более мин, Холмский метеограф способен эффективно отслеживать спектральные портреты штормов, проявляющихся у различных участков япономорского побережья.

Основные теоретические предложения и прикладные задачи в целом хорошо согласовались с выводами совместного анализа результатов прямых вычислительных экспериментов, высокоточных наблюдений на Холмском метеографе и оценочными наблюдениями за волновым режимом с борта НИС «Павел Гордиенко».

Использование сети аналогичных метеографов, непрерывно поставляющих информацию о состоянии моря в единый аналитический центр, существенно повысит эффективность морских служб Сахалинской области, отвечающих за оперативный прогноз опасных морских явлений и безопасность человеческой жизни на море.

Бортовой комплекс контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля

Унифицированная автоматическая гидрометеостанция в зависимости от круга решаемых задач может комплектоваться различными функциональными блоками:

- 1) комплект синоптических датчиков для непрерывной регистрации состояния атмосферы (скорость и направление ветра, давление, температура и влажность воздуха и др);
- 2) стандартный судовой комплект (считыватели показаний координат, курса и скорости судна, а также дополнительные датчики углов крена, дифферента и вертикальной качки судна, в том числе получаемых с помощью путевого эхолота, рис. 3.37);
- 3) автономный шлюпочный комплект, дооснащенный компасом и приемником Глобальной системы позиционирования (GPS).

Предполагается, что данный комплект измерительного оборудования и специальное математическое обеспечение позволяют оперативно решать следующий круг задач:

- a) автоматический сбор, обработка и передача оперативной информации о состоянии моря и атмосферы в соответствии с регламентом работы судовых гидрометеоцентров или гидрометеопостов;
- б) применение измерительного комплекса и оборудования связи с береговыми метеоцентрами в качестве автоматизированной экспертной системы для анализа режимов безаварийного плавания и оптимизации хода судна в условиях штормового волнения;
- в) использование специализированных и адаптированных к местности вычислительных экспериментов по моделированию процессов взаимодействия атмосферы и океана, в том числе для прогноза развития опасных морских явлений;
- г) анализ волнового режима вблизи морских портов и на удаленных морских акваториях с использованием сети прибрежных гидрофизических станций, сочетаемых с параллельными наблюдениями с борта экспедиционного судна, курсирующего вблизи побережья.

Последняя прошла успешное практическое опробование в гидрографических изысканиях при подготовке к проведению дноуглубительных работ и реконструкции Холмского морского порта.

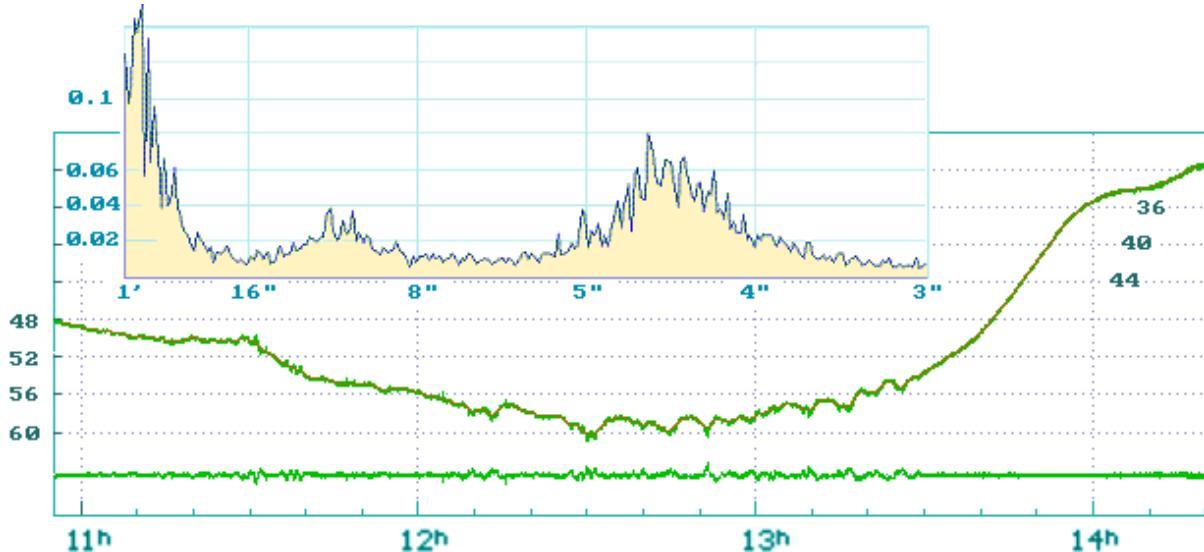


Рис. 1.8. Пример цифровой записи отсчетов глубины гидрографического эхолота ELAC LAZ-4700. Нижний график показывает высокочастотную составляющую записи, отфильтрованную в 3 минутном окне. На врезке показан оценочный спектр этой записи в диапазоне периодов вертикальной качки судна от 3 с до 1,0 мин. Усиление спектра на периодах 4-5 с соответствует хорошо наблюдаемой килевой качке, 10-12 с – бортовой. На нижней оси эхограммы указано время суток в часах, на левой вертикальной шкале – глубина моря в метрах.

При изучении волнового режима сахалинского шельфа успешно использован навигационный GPS-приемник. Этот прибор с высокой точностью замеряет пульсации скорости хода судна, что может служить как для оценки ходкости на волнении, так и для изучения динамики поверхностных течений по маршруту движения судна.

Таким образом, использование регистраторов качки в представленной математической модели морского волнения, предназначено для приборной идентификации параметров морского волнения, вплоть до прогноза характеристик ближайших встречных 2-3 волн, с возможностью выработки указаний на курс и скорость хода судна для уклонения от наиболее опасных штормовых волн.

Путевая регистрация и анализ параметров качки и пульсаций скорости хода судна, сопоставление их с нагрузкой на движителях и динамикой перекладок руля, необходимы при оптимизации хода судна в условиях умеренного волнения и для поиска решений при выборе безопасных режимов штормового плавания.

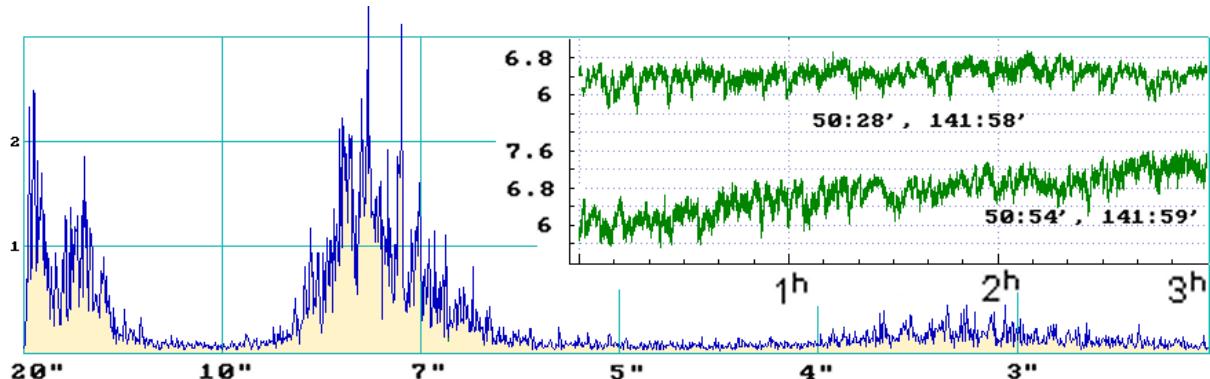


Рис. 1.9. Спектральная оценка пульсаций абсолютной скорости хода гидрографического судна ГС-210, выполненная по ежесекундным отсчетам приемника GPS и два трехчасовых фрагмента записи этой скорости (справа вверху). На спектрограмме выделяются пульсации скорости с периодом 4-5 с, соответствующие кильевой качке, а также порядка 10-15 с – отмечающие наибольшие потери хода при бортовой качке и вызываемые ею рыскания судна на курсе. Изменения скорости с периодами 1 минуты и более соответствуют сейшевым колебаниям скоростей поверхностных течений в близ береговой зоне, по которой проходил маршрут судна.

По мере накопления данных о волновой динамике судов с различными обводами корпуса, они могут быть использованы при поиске оптимальных проектных решений о форме корпуса и общекорабельной архитектуре новых кораблей, что особенно важно для специализированных проектов, в которых функциональные требования к оборудованию или к условиям базирования не могут быть в полной мере согласованы с требованиями безопасности в штормовом плавании.

Сверхмалый телекомандируемый гидрофизический модуль для решения задач оперативного контроля морских акваторий

Одним из эффективных методов контроля морских акваторий может быть использование малогабаритных автоматизированных плавсредств, способных выполнять поставленные задачи в штормовых условиях открытого моря, в сложных в навигационном отношении прибрежных акваториях, в том числе с соблюдением повышенных мер безопасности, экологической чистоты и скрытности обследования водной поверхности.

В результате исследований штормовой мореходности корабля [Храмушин, 2003] показана принципиальная возможность сохранения требуемых мореходных качеств малого корабля в условиях интенсивного морского волнения. Это может быть использовано при создании самоходных модулей, управляемых из удаленных информационных береговых или корабельных центров. Такие сверхмалые корабли способны решать широкий круг задач гидрофизического обследования акваторий как в открытых морях, так и в сложных условиях плавания вблизи побережья, в морских портах и во внутренних гаванях, в том числе в местах, опасных или недоступных для традиционных плавсредств.

Возможность одновременного применения нескольких самоходных аппаратов с измерительной аппаратурой, синхронно работающей в системе единого времени, существенно повышает эффективность ком-



Рис. 1.10. Испытание телекомандируемого гидрографического модуля в открытом море

плексного мониторинга больших по площади морских и прибрежных акваторий.

Важной методической особенностью обследования морских и прибрежных акваторий с помощью сверхмалого флота является возможность одновременного применения нескольких автоматизированных кораблей, с измерительной аппаратурой синхронно работающей в системе единого времени, что существенно повышает эффективность решения задач комплексного мониторинга морских и прибрежных акваторий.

В дальнем автономном плавании телеуправляемый гидрофизический модуль может обеспечить непрерывную поставку гидрофизической и гидрометеорологической информации о состоянии удаленных морских акваторий, при этом экспедиционные расходы по обеспечению постоянного присутствия в требуемых районах океана будут предельно минимальными.

Один или несколько одновременно работающих самоходных гидрофизических модулей смогут наиболее экономичным и эффективным способом выполнить следующие виды морских изысканий:

- синхронные измерения гидрофизических параметров на акваториях портов и гаваней, в прибрежной полосе и устьях рек, в районах проведения морских работ в шельфовой зоне;
- картирование параметров состояния морских вод и построение батиметрических карт при поиске фарватеров и планировании гидротехнических работ;
- выполнение контрольных и охранных функций на подходах к базам флота при проведении поиска подвижных и заякоренных подводных объектов;
- экологическое обследование поверхности морских акваторий, получение информации об опасных морских явлениях или контроль состояния аварийных инженерных сооружений, выполнение других

морских работ, участие человека в которых невозможno, опасно или нежелательно.

Сверхмалые телеуправляемые гидрографические корабли могут задействоваться в портовых акваториях, устьях рек и прибрежных мелководьях, в том числе в условиях плавания на интенсивно обрушающемся волнении. Обладая высокой мореходностью и проходимостью в сложных условиях плавания, такие корабли незаменимы в проведении батиметрических промеров и гидрографических изысканиях в сложных в навигационном отношении акваториях.

Реализуемые проекты сверхмалых кораблей могут быть использованы при создании современной автоматизированной системы обследования портовых акваторий, устьев рек и прибрежных мелководий, в том числе с целью контроля экологических процессов на море и вблизи побережья. Обладая высокой проходимостью, такие корабли будут полезны при проведении батиметрических промеров и других гидрографических обследований сложных в навигационном отношении морских и прибрежных акваторий.

Длинноволновое районирование побережья с борта экспедиционного судна.

По задачам изучения особенностей мореходства и безопасности мореплавания в морских акваториях Сахалинской области в экспедиционных условиях выполнялись длительные по времени записи глубины моря и координат судна с ежесекундной дискретностью.

При анализе данных обнаружилось, что в записях мгновенных значений координат, кроме параметров качки и ходкости судна с достаточной достоверностью выделяются пульсации поверхностных течений в диапазоне сейшевых колебаний уровня моря.

Установленная на верхнем мостике антenna приемника Глобальной системы позиционирования (GPS) дала возможность оце-

нить динамику длинноволновых процессов на маршруте движения экспедиционного судна «Павел Гордиенко», которое, по согласованию с капитаном Е.А. Слизковым, шло на юг от Александровска-Сахалинского по 20-метровой изобате со средней скоростью порядка 6-7 узлов. Результаты таких наблюдений за пульсациями скорости поверхностных течений приведены на рис. 1.8.

На протяжении всего перехода вдоль побережья Сахалина (рис. 1.13) стояла спокойная погода, условия качки судна не изменились. С юго-запада со стороны Татарского пролива к побережью Сахалина подходила морская зыбь с высотой порядка 0,5–1,0 м и длиной волны от 20 до 40 м, создающая условия для генерации шельфовых волн на прибрежном мелководье.

Экспедиционные наблюдения подтвердили также эффект увеличения амплитуды длинноволновых колебаний уровня моря на небольшом удалении от берега, полученный ранее при численном моделировании длинноволновых процессов в шельфовой зоне о-ва Сахалин.

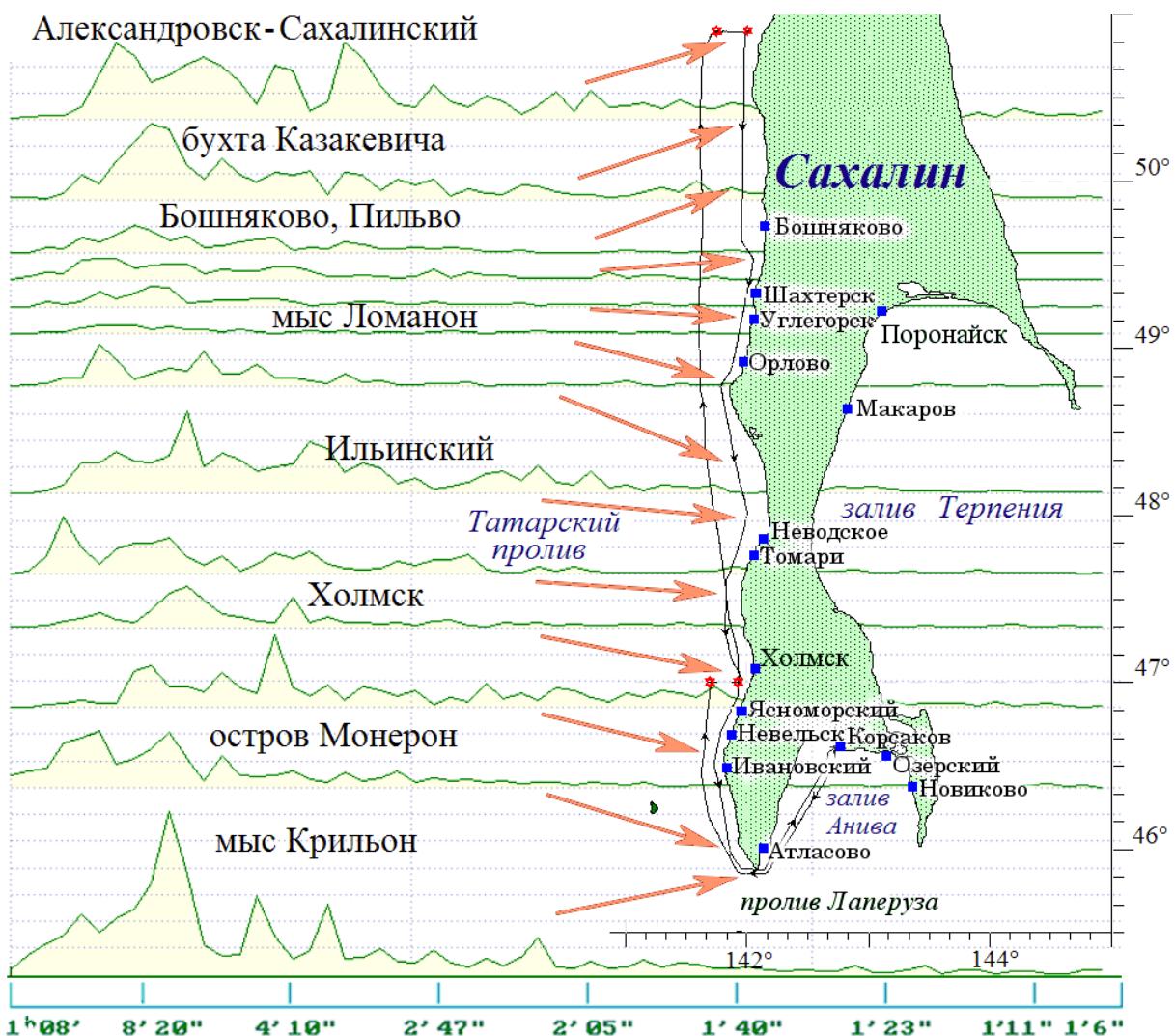


Рис. 1.11. Распределение спектральной энергии пульсаций скорости хода судна вдоль побережья о-ва Сахалин в Татарском проливе. Слева от каждого из графиков указаны географические координаты точки, от которой начиналась четырехчасовая ежесекундная запись, использованная при расчете спектрограмм. Данные о длинноволновом режиме вблизи побережья получены за один безостановочный проход экспедиционного судна вдоль побережья с севера на юг. Активные колебания с периодами около 8 мин возникают у мыса Крильон, высокочастотные составляющие которых ослабевают под прикрытием острова Монерон. У мыса Лопатина (Горнозаводск и Невельск) шельф становится уже, и на нем проявляются колебания течений с периодами 1,5–3 минут, которые ослабевают на подходах к Холмскому порту. В районе обширного шельфа у поселка Ильинское длинноволновые процессы снова активизируются, достигая экстремумов в диапазоне волн с периодами от 4 до 6 мин. Севернее мыса Ломанон активность колебаний заметно уменьшается, что обусловлено отсутствием морской границы шельфа, а у побережья Александровска-Сахалинского, отличающегося частыми проявлениями морских наводнений, активность пульсаций поверхностных течений значительно возрастает во всем диапазоне периодов длинных волн.

Длинноволновой режим северо-восточного шельфа о-ва Сахалин

Гидрографическое судно ГС-210 двигалось вдоль сахалинского побережья на юг от порта Кайган к мысу Терпения по изобатам 15–20 м. Судно обладает малой осадкой и большим развалом бортов в оконечностях, отчего скорость заметно изменяется при усилении кильевой качки, что связано с интенсивными гидродинамическими процессами на подъемах и скатах корпуса на волнах охотоморской зыби.

Заметное угасание пульсаций скорости хода, отмечаемое на верхнем графике (рис. 1.11) происходит сразу же после поворота судна на вход в залив Терпения из открытой акватории Охотского моря.

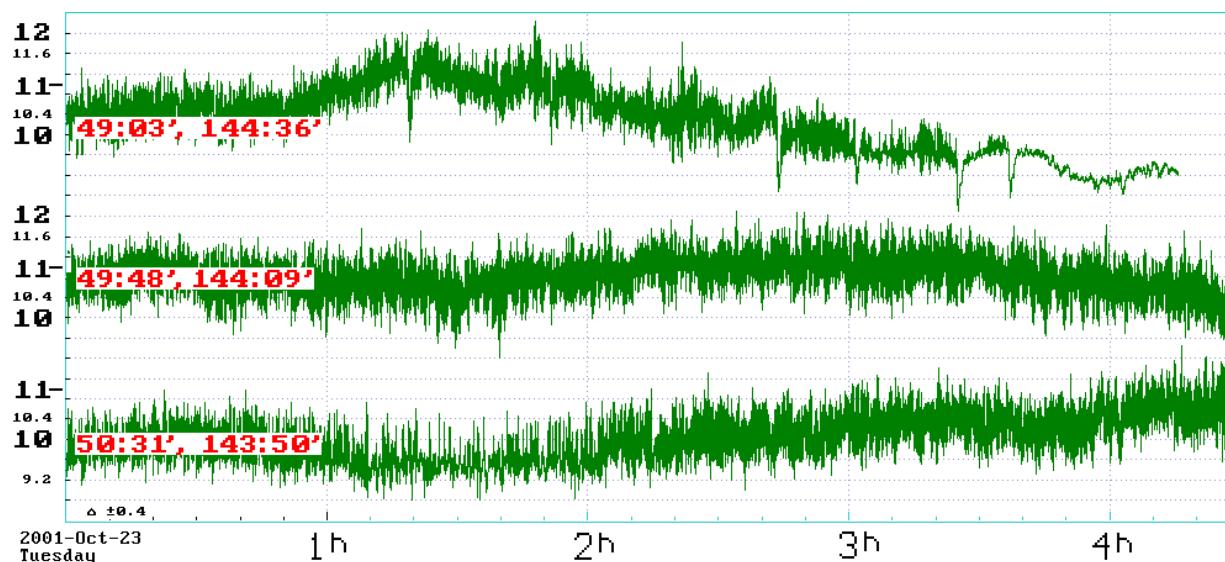


Рис. 1.12. Графики записей скорости хода гидрографического судна ГС-210 на северо-восточном шельфе острова Сахалин. На вертикальной шкале приведена скорость хода судна в узлах. На горизонтальной шкале время в часах. В левой части графиков показаны географические координаты, с которых начинается запись.

На больших периодах в диапазоне от 15 до 40 с, соответствующих изменений скорости хода судна практически не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии перекачки энергии волн зыби в длинноволновую составляющую прибрежных сейшевых колебаний.

Длинноволновая составляющая пульсаций скорости вдольберегового течения начинает проявляться на периодах порядка 1 минуты. Это означает, что в прибойной зоне на побережье происходит перекачка энергии волн зыби в захваченные прибрежные волны, которые постоянно трансформируются в другие длинноволновые процессы с периодами 8 и 14 мин, выявлены ранее в качестве резонансных при проведении вычислительных экспериментов.

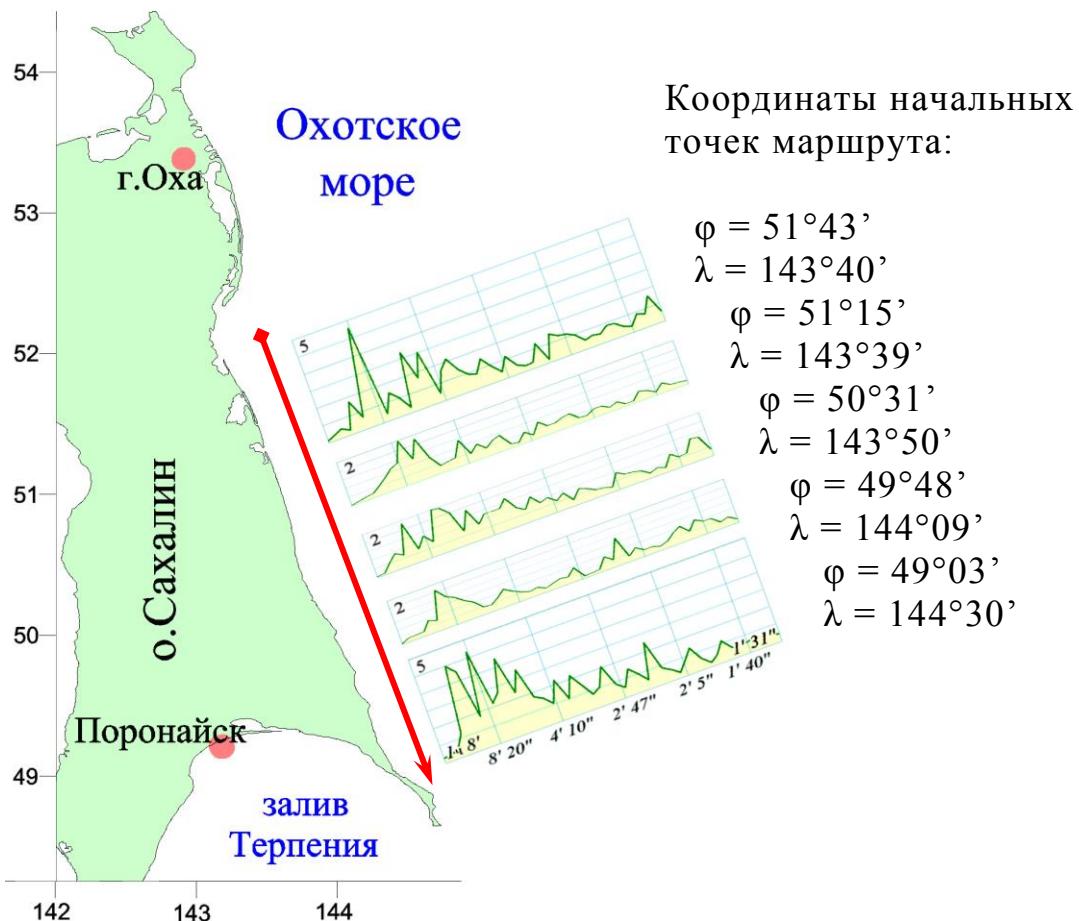


Рис. 1.13. Оценка формы пульсаций вдольбереговых течений на сахалинском шельфе от порта Кайган до мыса Терпения. Цифры в левом верхнем углу спектрограмм дают количественную энергию волн, на нижней оси – периоды пульсации скорости хода судна в минута (‘) и секундах (“). Географические координаты справа от графиков отмечают начальную точку маршрута судна, по которому делались оценки интенсивности колебаний скорости течения.

Интенсивность перекачки энергии волн зыби в длинноволновые колебания уровня моря на сахалинском шельфе довольно высока, что наглядно подтверждается наблюдениями за пульсациями

вдольбереговой составляющей скорости поверхностного течения вблизи порта Кайган, в меньшей степени близи мыса Терпения и в других пунктах по маршруту судна.

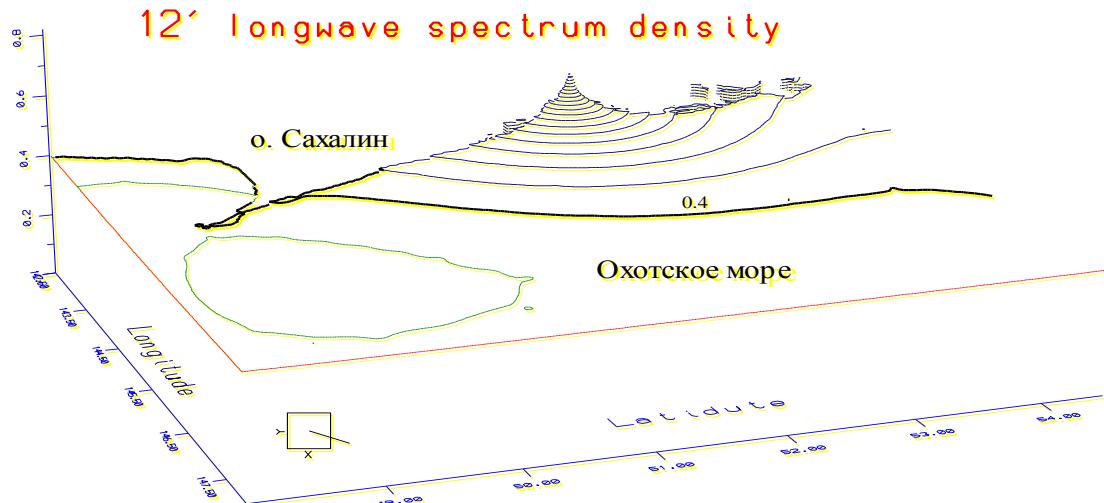


Рис. 1.14. Характерное распределение длинноволновой энергии собственных колебаний уровня моря с периодом 12 минут. Спектральные экстремумы проявляются в локальной области к востоку от Ныйского залива, в этой же области следует ожидать очень интенсивного сгонно-нагонного отклика уровня моря и существенного усиления течений при проявлении любых метеорологических или сейсмических воздействия на поверхность моря, в том числе происходящих на большом удалении от акватории сахалинского шельфа

На рис. 1.13 показано расчетное поле спектральной энергии длинноволновых колебаний на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин. Столь высокая концентрация волновой энергии в акваториях, планируемых для активного развития нефтегазопромыслов, требует действенного и непрерывного наблюдения за процессами взаимодействия атмосферы и океана, постоянного контроля прибрежных наводнений, экстремальных скоростей течения, которые могут возникнуть даже под воздействием морской зыби от далеких штормов.

Для оценки интенсивности волновой динамики сахалинского шельфа д.г.н Р. П. Бернгардтом в экспедиционных условиях производились замеры интенсивности кильевой и вертикальной качки судна, на величину которых не оказывают существенного влияния резонансные свойства корпуса, ввиду его высоких демпфирующих свойств по этим видам качки.

При регистрации волнения по килевой качке судна было отмечено, что в заливе Чайво период волны превышал 15 с. В этой же акватории вычислительный эксперимент по выявлению резонансных колебаний прогнозировал образования интенсивной сейшевой волны с периодом порядка 12 мин (Рис. 1.13).

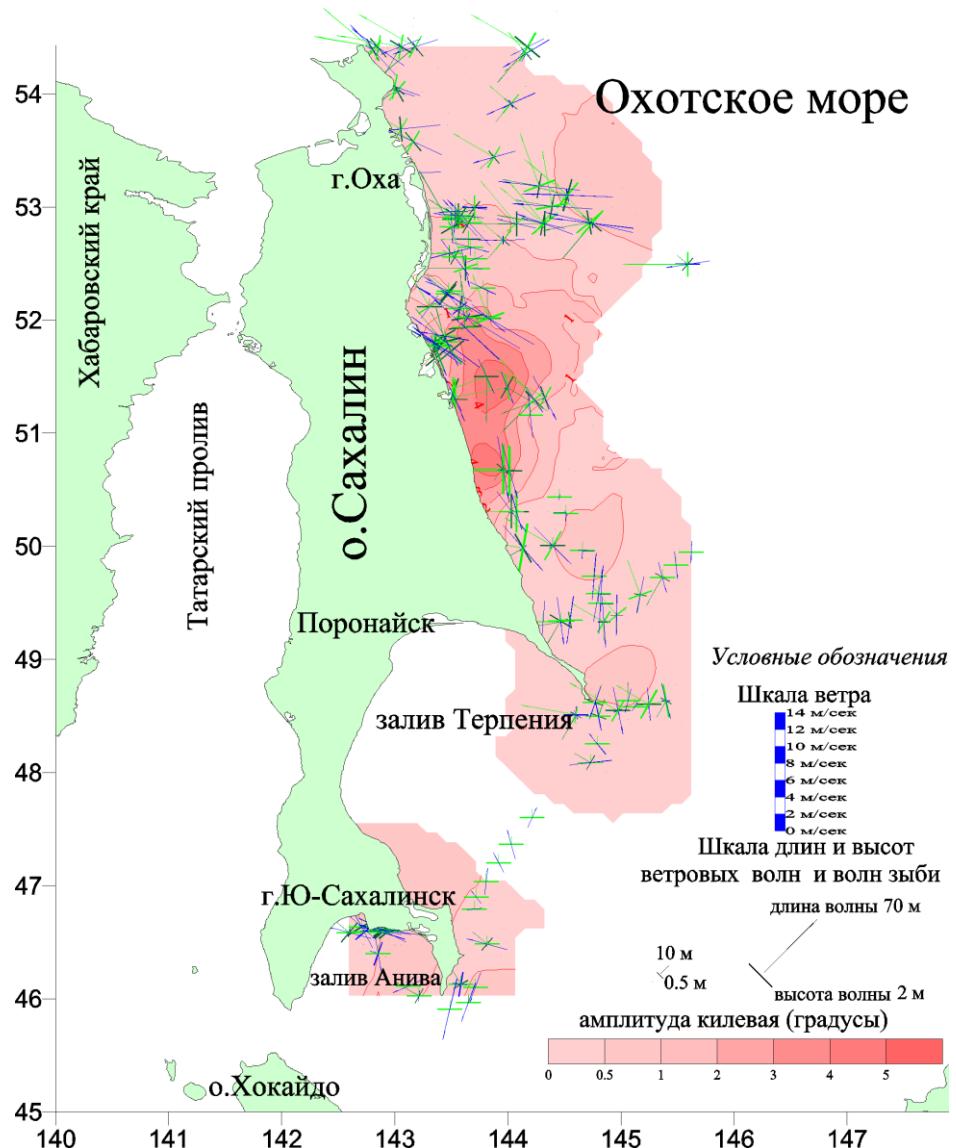


Рис. 1.15. Совмещенное представление экспедиционных наблюдений за ветром, волнением и двумя системами волн зыби, изображенными на фоне поля замеров размаха килевой качки судна. Направление и длина стрелок показывают величину скорости ветра (м/с) или длину наблюдаемых с борта судна ветровых волн и зыби (м). Поперечные отметки, изображенные у основания стрелок, показывают высоту (м) ветрового волнения или зыби, соответственно

Наличие длиннопериодной зыби показывает активную трансформацию волн зыби в сейшевые колебания уровня моря в этой прибрежной акватории, что объясняется активными дисперсионными процессами в этой прибрежной акватории. Это также означает, что при усилении шторма в этой акватории возможно накопление длинноволновой энергии сейшевых колебаний уровня моря, приводящих к наводнениям на побережье, а также к периодическому повышению уровня моря в районе морских стационарных сооружений.

На Рис. 1.14 представлены ветер, волнение и зыбь на фоне поля замеров размаха кильевой качки, показывает, что зарегистрированная кильевая качка практически не связана с интенсивностью ветрового волнения и зыби, а достигает максимальной величины именно в той области, где в вычислительных экспериментах (рис. 1.13) найдены пучности собственных колебаний уровня моря с периодами порядка 12-14 минут.

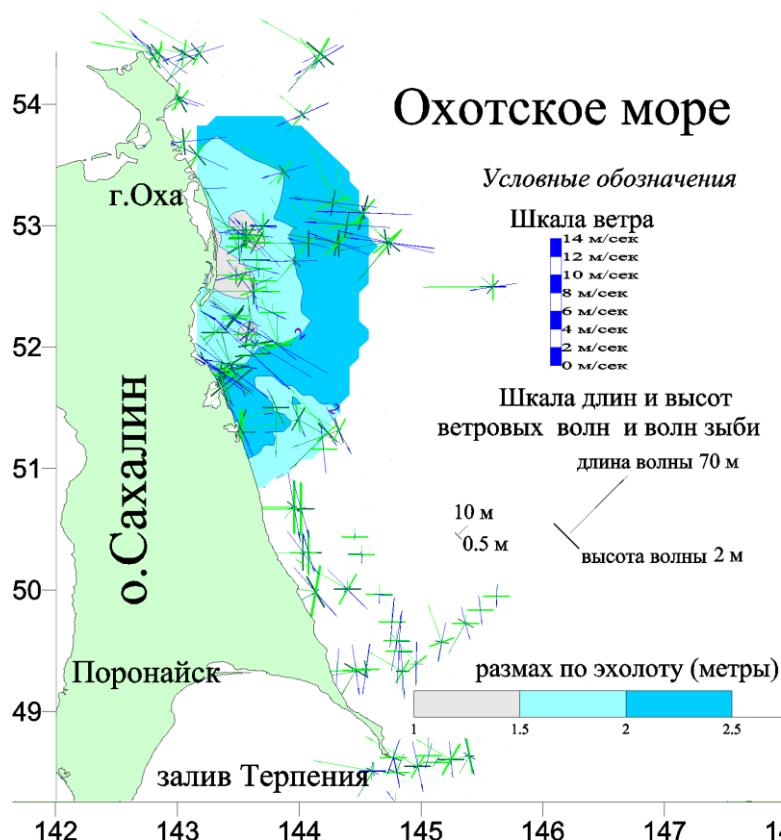


Рис. 1.16. Изображение поля интенсивности вертикальной качки судна, зарегистрированное по наблюдениям за шириной полосы записи судового эхолота

По судовым наблюдениям именно с такой периодичностью на поверхности моря появлялись пакеты волн зыби максимальной высоты (солитоны, или слабовыраженные «волны убийцы» - по определению наблюдателя), которые как раз и приводили к существенному усилинию килевой качки и проникновению воздушной пульпы под днище судна, регистрируемой навигационным эхолотом.

По наблюдениям за записями судового эхолота регистрировалась интенсивность вертикальной качки экспедиционного судна (рис. 1.15), а также длинноволновых колебаний уровня моря. По эхолоту наблюдалось периодическое изменение уровня моря в сейшевом диапазоне периодов, с высотой от 1.5 до 2.5 метров. Максимальная ширина закраски ленты эхолота отмечалась только вблизи залива Набиль, на участке прибрежной акватории, где ранее в вычислительных экспериментах были выявлены зоны с высокой доброкачественностью собственных колебаний уровня моря.

Известно, что на этом же участке побережья наблюдается интенсивное разрушение берегов и ежегодное изменение геометрии протоки Асламбекова, в том числе связанное с образованием крупных стамух и активным торошение льда в прибрежной акватории в зимний период.

К северу и к югу от этого активного участка побережья иногда, по наблюдениям за килевой качкой отмечалось более интенсивное волнение, однако по записям эхолота в экспедиции не зафиксировано столь же интенсивной вертикальной качки судна. К примеру, по записям эхолота в районе Чайво отмечалось более чем двукратное ослабление интенсивности изменений уровня по сравнению с районам залива Набиль, при этом результаты замеров по эхограмме обладали довольно высокой достоверностью, практически без выбросов в измеряемых величинах.

Далеко в море, к северо-востоку от залива Набиль по эхолоту наблюдались не менее интенсивные изменения уровня моря, что говорит о наличии «канала» для оттока длинноволновой энергии, проходящего мористее значительно сахалинского побережья, на удалении от берега на величину порядка длины 15 минутной сейшевой волны (20-25 км). При этом вблизи побережья наблюдались существенно меньшие колебания уровня моря, что также подтверждается анализом метеографных записей, полученных при проведении вычислительных экспериментов.

1.5. Использование новых разработок в морских службах и центрах предупреждения об опасных морских явлениях

Для ускоренного анализа гидродинамических процессов в океане удобно использовать кинематическую модель распространения длинных волн, которая позволяет строить карты изохрон и лучей (изолиний волновых фронтов и направлений их движения). При моделировании длинноволновых процессов эти процедуры могут быть использованы для экспресс-анализа кинематики волновых процессов, например: с целью приближенной экстраполяции данных о состоянии моря поступающих от удаленных постов наблюдения.

Кинематические модели распространения длинных волн позволяют произвести картирование маршрутов распространения волновой энергии, как для локальных источников, так и в случае подхода волн из других акваторий Тихого океана или Охотского моря.

О гидрофизической станции на свале глубин вблизи м. Левенорна

Вблизи мыса Левенорна на острове Сахалин расположен гидрофизический стационар СКБ САМИ ДВО РАН. В соответствии с программой построения Единой автоматизированной системы цунами

ми (ЕАСЦ), в начале 90-х годов на этом стационаре был установлен и испытан донный глубоководный регистратор цунами. Это кабельный прибор, вынесенный более чем на 20 км в море, зондирующий поверхность моря гидроакустическими методами.

Совместно с гидрофизическими измерениями динамики взаимодействия атмосферы и океана вблизи побережья, просветные гидроакустические методы могут оказаться наиболее эффективными в решении задач заблаговременного оповещения об опасных морских явлениях, так как они обеспечивают подводное дистанционное зондирование состояния вод и динамики поверхности моря, одновременно выявляя малейшие сейсмические шумы на морском дне.

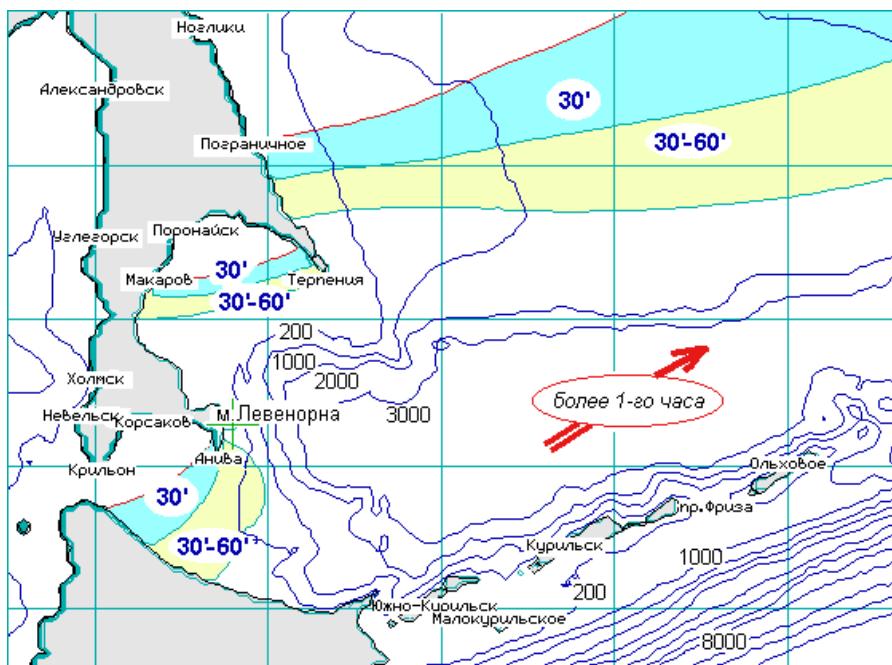


Рис. 1.17. Южная часть Охотского моря и зоны заблаговременного предупреждения для береговых пунктов в Корсакове, Поронайске и в Ногликах обеспечиваемые гидрофизическими станцией на мысе Левенорна.

Ключевое значение имеет географическое положение прибрежного поста и наличие возможности оперативной доставки информации в центр для ее анализа и принятия решений об угрозе опасных морских явлений. Указанному критерию для острова Сахалин удовлетворяет гидрофизический полигон на м. Левенорна,

находящийся в непосредственной близости к свалу глубин Курильской котловины (рис. 1.16).

Максимальное время, которое может обеспечить гидрофизическая станция на мысе Левенорна для выполнения действий по тревоге цунами, составляет 90 мин. Учитывая близость мыса Левенорна к Курильской котловине, оперативная регистрация скорости течения и изменения уровня моря позволит использовать установленный здесь гидрофизический пост в качестве опорной точки при вычислительном моделировании гидродинамических процессов и прогноза опасных морских наводнений и цунами практически для всего Охотоморского побережья о-ва Сахалин.

Использование прямого численного моделирования в действующих службах предупреждения об опасных морских явлениях

В настоящее время готовые математические комплексы для оперативного прогноза амплитуд и времени действия цунами, разработанные в лаборатории цунами, переданы в Центр цунами Сахалинского УГМС для опытной эксплуатации.

1. Сразу по получении координат источника цунами или атмосферного тайфуна, может быть выполнен быстрый расчет коэффициентов усиления по сходимости лучевых трубок, зависящих от параметров поля времен распространения фронта длинной волны от конкретного источника. Данный алгоритм позволяет оценить амплитуду первого вступления волны наводнения, которая для открытого побережья может быть и максимальной.

2. На втором этапе необходимо определить влияние шельфовой зоны на процесс трансформации и усиления длинноволновых процессов, которые будут происходить спустя некоторое время после первого проявления морских наводнений на побережье. Такой анализ обстановки на различных участках побережья может быть сде-

лан с помощью информационной системы (или базы данных), в которой должны быть собраны исторические и расчетные данные о проявлениях длинных волн на побережье.

3. Первые два оценочных расчета могут быть выполнены в считанные секунды и повторены в случае поступления новых данных об источнике наводнения или информации о реальных замерах высоты и периода волн на береговых постах наблюдения. С помощью опережающего численного моделирования можно сделать наиболее обоснованные прогнозы о степени опасности цунами для конкретных населенных пунктов и участков побережья. Такое моделирование также необходимо для экспертизы решений о распределении сил при оказании экстренной помощи пострадавшим береговым поселениям.

Глава 2. Математические и алгоритмические модели для построения вычислительных экспериментов при решении длинноволновых гидродинамических задач

Современная вычислительная математика, в условиях стремительного развития прикладных наук, техники или точного приборостроения, обновляется в достаточно медленном методичном темпе, что обусловлено консерватизмом математического языка и особенностями его практического использования, требующего сохранения традиционных научных школ и преемственности в наукоемких и технологически сложных отраслях промышленности.

В таком случае становится обоснованным рассмотрение математических основ проектирования и построения прямых гидродинамических вычислительных экспериментов, нацеленных на создание базовой логики, новых числовых объектов и унифицированных математических операций, в полной мере соответствующих особенностям цифровой вычислительной техники и методам алгоритмического представления прикладных задач механики сплошных сред.

Теоретическая гидродинамика, как специальная наука со строгими методами решения задач механики сплошных сред, создана в Российской академии наук трудами *Леонарда Эйлера (1707-1783)* и *Даниила Бернулли (1700-1783)*, определившими фундаментальные основы современной теоретической и экспериментальной гидромеханики.

В системе уравнений движения сплошной среды Эйлером впервые разделены силовые реакции жидкости на точечные векторы сил (по Ньютону) и сопутствующие им конвективные составляющие, обусловленные деформацией малых частиц жидкости.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{r}} \cdot \vec{v} = \vec{F} - \frac{\partial(p/\rho)}{\partial \vec{r}}.$$

В системе уравнений Эйлера все величины измерены в единой и неподвижной системе отсчета, v [м/с] – скорость в точке измерения течения; t [с] – отсчет времени; $\frac{\partial}{\partial r}$ [$1/m^3$] – тензорное определение пространственной (конвективной) производной; p [кг/(с²·м)] – точечное давление; ρ [кг/м³] – плотность жидкости.

Мир компьютерных моделей не совсем однозначно отображается на современную математику, представляющую законы движения жидкости в форме систем дифференциальных уравнений в частных производных. Нельзя ли конечноразностные объекты и операции, присущие цифровым ЭВМ, использовать как независимый математический инструмент? Де-факто, математические основы такого подхода хорошо разработаны *О.М. Белоцерковским и Ю.М. Давыдовым* [1982, 1984] как «Метод крупных частиц», иногда обобщаемый в литературе под названием «Метода конечного объема» [Андерсен и др, 1990].

Но все же пионерскими исследованиями в этом направлении считаются вычислительные эксперименты в аэрогидромеханике Лос-Аламосской лаборатории (США), открывшими новое научное направление по использованию свободных Лагранжевых частиц для моделирования сложных течений и опубликованных Харлоу в 1955 году под определением: PIC (Particle in Cell) – метода частиц в ячейках. Новый метод изначально ориентирован на использование огромных вычислительных ресурсов, так как уравнения гидромеханики в форме Лагранже сводятся к неявным решениям матричной алгебры для согласования неопределенных параметров движения и внутреннего состояния для каждой из условной свободных точечных отметок в потоке жидкости. Таких точечных отметок всегда должно быть достаточно много в каждой из анализируемых расчетных ячеек, в том числе и в зонах течения с сильным разрежение, что и обу-

словливают необходимость задействования суперкомпьютерных ресурсов.

Другой подход к пристальному изучению вычислительных экспериментов обусловлен признанием факта, что конечные разности для аппроксимации систем дифференциальных уравнений в частных производных, по сути представляют нечто существенно отличающееся от исходной математической модели. Глубокая проработка обратных дифференциальных приближений для разностных схем механики сплошных сред выполнена Н. Н. Яненко [1985] и Ю. И. Шокиным [1979] на базе Вычислительного центра Сибирского отделения Российской академии наук. В результате было получено не только обоснование области применимости численных методов гидромеханики с использованием неподвижных Эйлеровых сеток, но и обозначены физические свойства и особенности тех жидкостей, которые моделируются разностными численными схемами первого, второго и более высоких аппроксимационных порядков.

Как и ожидалось, вычислительная математика и гидромеханика явили новое воплощение гармонии в природе, совместный Лагранжев и Эйлеров подход снова воссоздали целостное представление о физике моделируемых гидродинамических процессов, на этот раз с помощью прямых численных методов на дискретных сеточных аппроксимациях современных цифровых ЭВМ. А именно, численные схемы метода крупных частиц (*конечного объема*), воссоздали средневековые представления Исаака Ньютона о дуальности свойств жидкости, использованные им и Робертом Гуком при определении вязких и упругих свойств реальной жидкости более трехсот лет назад.

Используемое для представления вычислительной модели тензорное исчисление традиционно применяется в гидромеханике с целью анализа состояния малых континуумов жидкости. В «Механике

деформируемых сред» Арнольда Зоммерфельда [1954] довольно полно определено тензоры деформации, конвективных скоростей и вязких напряжений в жидкости. В книге итальянских ученых Дж. Астариты и Дж. Маруччи [1978] «Основы гидромеханики не-ニュтоновских жидкостей» сводятся воедино существенно различные тензорные представления, накопившиеся в гидромеханике, теории упругости и других разделах механики сплошных сред. В «Прикладной механике сплошных сред» под редакцией В. В. Селиванова [1998], тензорное исчисление активно используется для анализа численных моделей Лагранже-Эйлорова подхода в аэрогидродинамических вычислительных экспериментах.

В настоящей работе не ставилось целей глубокого изучения тензорного анализа в задачах гидромеханики в целом. Активно используется только та часть тензорного исчисления, которая имеет прямое представление в численных схемах для построения вычислительных экспериментов.

2.1. О постановке и численном решении длинноволновых задач

Традиционно вычислительные эксперименты в гидромеханике относятся к ведению классической дисциплины: «Математическая физика», которая в настоящее время получила совершенно новую аппаратурную поддержку в виде мощных вычислителей – компьютеров. Однако, постановка задачи путем разностной аппроксимации систем дифференциальных уравнений в частных производных, не позволяет формализовать численные решения для прямого описания многомерных полей гидромеханики, сводя моделирование течений к последовательной обработке больших цифровых массивов, что, в принципе, согласуется с необходимостью использования только одного арифметико-логического устройства ЭВМ.

Постановка алгоритмических задач на однопроцессорных компьютерах существенно усложняет математические модели гидромеханики, для эффективной реализации которых приходится использовать интегро-дифференциальные аналитические обобщения или асимптотические упрощения пространственных полей, фактически подменяя прямое численное моделирование привычными оценками физических явлений с помощью традиционного математического аппарата. Это обосновывает актуальность рассмотрения вычислительных основ механики жидкости, изначально учитывающих трехмерность физических полей и необходимость использования минимума арифметических операций, которые по мере развития вычислительной техники могут стать присущи каждой ячейке оперативной памяти ЭВМ, обеспечивая тем самым глубокое распараллеливание всех вычислительных процессов.

Вычислительные эксперименты в гидромеханике по моделированию морских наводнений, оперирующие многомиллионными массивами данных о состоянии окружающей среды, представляются идеальным физическим процессом, имеющим строгую математическую основу для построения специального языка и его прямого алгоритмического представления, максимально приближенного к особенностям цифровой вычислительной техники, в том числе создающих проектные предпосылки для создания новых поколений компьютеров с глубоко распараллеленными процессами моделируемых физических процессов.

Построение численных схем на векторных формализациях

Гиперболическое уравнение Гельмгольца о распространении продольных волн в упругой среде (*длинных волн на море*) допускает каноническое представление математической модели и явную одностадийную постановку вычислительной задачи для построения неста-

ционарных во времени вычислительных экспериментов и тестирования различных, и в том числе гибридных численных схем. Стандартная математическая модель может иметь классическую форму записи в виде системы дифференциальных уравнений гидромеханики в частных производных.

Эта модель, после допущений о малости влияния конвективных эффектов, довольно легко сводится к одному дифференциальному уравнению второго порядка, но в численном решении эти модели не могут быть названы идентичными:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + C^2 \frac{\partial \eta}{\partial \vec{r}} = 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{r}} \right) = 0 \end{cases} \quad \left| \begin{array}{l} \left(\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \right) \\ \frac{\partial}{\partial t} \end{array} \right. \Leftrightarrow \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - C^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial \vec{r}^2} = 0,$$

где: $\vec{H} = \eta + D$ – полный уровень моря, с учетом высоты волны; $\vec{U} = V \cdot \vec{H}$ – скоростной поток жидкости учитывает влияние глубины моря; $C^2 = g \cdot H$ – скорость свободного движения волны здесь выступает в качестве весового коэффициента. В записи уравнений использовано формальное векторное представление пространственной производной для $\overset{\rightarrow}{\delta r}$, которая соответствует градиенту (grad), а в случае использования простых скобок – как дивергенцию (div), квадратных – ротор (rot). Однако такая формализация математических операций не дает возможности строгой и полной интерпретации физических процессов при построении реальных вычислительных экспериментов в гидромеханике, что обусловлено невозможностью сведения реологических свойств жидкости к одной – бесконечно малой точке.

Аналогичную по форме численную модель (рис. 2.1) можно построить прямым рассмотрением сил на границах малого деформируемого контрольного объема (метод конечного объема), когда дифференциалы изначально трактуются в виде конечных разностей.

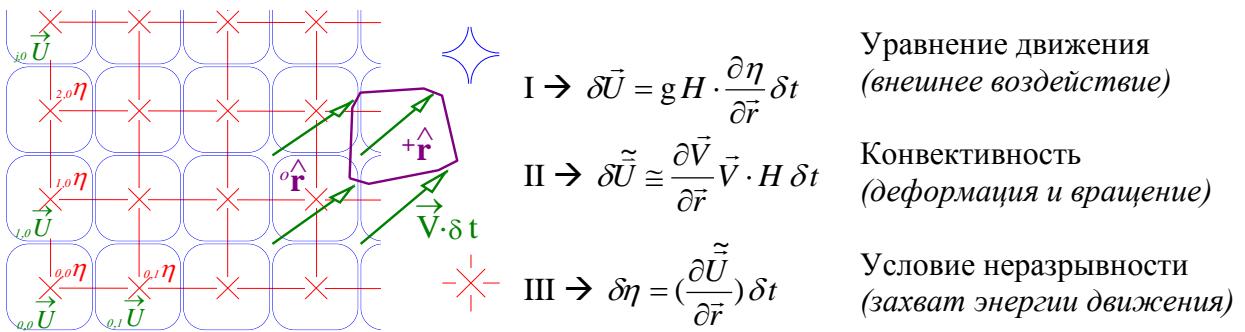


Рис.2.1. Выделение элементарного вычислительного объекта – крупной частицы жидкости из традиционной сеточной области дискретного разбиения пространственного поля, построенного для моделирования гидродинамических процессов на цифровой дискретной ЭВМ. Важно отметить, что дифференциальные (разностные) операции на сеточном пространстве всегда соотносятся не с узлами сетки, а с центрами масс (объемов) образуемых этими узлами элементарных частиц, внутри которых действуют линейные аппроксимации.

Полученная схема вычислений не связана непосредственно с волновыми (гиперболическими) решениями механики сплошных сред. Упрощающей особенностью длинноволновых решений является возможность пропуска этапа **II**, на котором определяются конвективные свойства течения. Для стационарных потоков идеальной жидкости (эллиптических уравнений математической физики) формально отсутствует этап **III**, точнее он является контрольным по условию сохранения объема жидкости при исполнении первых двух этапов. А так как на этапах **I** и **II** невозможно в явной форме разделить искомые векторные потоки U , то явное численное решение и задача о сквозном анализе численного решения традиционными методами становятся трудно неразрешимыми.

Традиционный вычислительный эксперимент по моделированию длинных волн в океане также ограничивается двумя этапами вычислений: **I** – где рассчитываются скорости течений для условно свободных частиц жидкости; и **III** – где нарушения сплошности среды в явном виде компенсируется накоплением внутренней энергии для этих же частиц. Даже столь упрощенные решения не удается в полной мере проанализировать традиционными методами диффе-

ренциального исчисления, в котором все расчеты сводятся к бесконечно малой и недеформируемой точке. Отрадно лишь то, что именно постановка исходной задачи в конечных разностях, определяемая как прямой вычислительный эксперимент, приводит к наилучшему согласованию результатов расчета с моделируемыми природными явлениями, что делает актуальным изучение математических моделей именно в такой изначальной постановке.

Включение в вычислительную модель этапа **II**, который, по сути, является интерполяционным оператором для учета малых, но конечных смещений моделируемых частиц жидкости, и переводит процесс моделирования к решению полной задачи механики сплошных сред, с учетом реологических свойств жидкости, как вязкость, упругость и сжимаемость. Однако на этом пути стоят сложнейшие теоретические проблемы, рассмотрение которых возможно только с помощью тензорных формализаций исходных конечноразностных моделей гидромеханики.

Из сказанного следует вывод, что вычислительные эксперименты в механике сплошных сред опираются на собственный математический аппарат конечных разностей (*как в пространстве, так и во времени*), в основе которого лежат аппроксимации непрерывных функций ограниченным количеством опорных величин, распределенных в дискретных ячейках памяти цифровой ЭВМ. Определенные дискретными массивами точек непрерывные в пространстве и времени процессы, не вполне соответствуют предположениям классического дифференциального анализа, законы которого справедливы для предельно близких интерполирующих точек, количество которых на ограниченном отрезке должно стремиться к бесконечности. По сути же, классические численные методы могли бы быть эффективными при их использовании на аналоговых моделирующих или вычислительных устройствах, но, к сожалению, кроме отсут-

ствия соответствующих аналоговых вычислителей, имеется множество чисто фундаментальных математических проблем, в первую очередь обусловленных недостаточностью аппарата дифференциального исчисления для точного описания и сквозной интерпретации физических свойств трехмерных векторных полей механики жидкости.

В настоящее время практически не существует прикладных вычислительных экспериментов в гидромеханике, в которых математическая модель и ее численная реализация обеспечивали бы безусловное и с заданной точностью решение задачи в произвольной расчетной области и при любых режимах течения жидкости. Но для того, чтобы обеспечить надежный контроль качества численного решения и своевременное применение усложненных гибридных алгоритмов или асимптотических аппроксимаций численных решений, при проектировании вычислительных экспериментов очень важно обеспечить возможность физической интерпретации всех, и том числе тривиальных вычислительных операций ЭВМ.

Логика создания вычислительных моделей и компьютерных алгоритмов для построения вычислительных экспериментов

Следуя обязательному правилу о сквозной физико-механической интерпретации всех вычислительных объектов и операций, выполняемых на ЭВМ при проведении вычислительного эксперимента, можно сформулировать основные требования, которые должны соблюдаться на этапе проектирования новых вычислительных экспериментов в гидромеханике:

- 1) Элементарные объекты гидромеханики должны определяться только в размерной форме;
- 2) Вычислительные операции должны быть определены в строгой взаимосвязи физических свойств жидкости и законов механики,

которые должны применяться в условиях автоматического преобразования координатных величин и пересчета физических размерностей;

3) Свойства вычислительных операций и элементарных числовых объектов определяются как в единой – абсолютной системе координат, так и в локальных - дуальных базисах, связанных с конкретными частицами жидкости.

Формально, на разных этапах вычислительного эксперимента может быть введен своеобразный векторный аналог Закона Ньютона,

на, определенного с помощью тензорной операции умножения, где внешняя сила F задается в абсолютной системе координат, а реакция W – уже в локальном базисе, вмороженном в элементарную деформируемую частицу жидкости. В этом случае масса жидкой частицы M будет становиться не только аккумулятором энергии поступательного движения, но также определяет инерционные свойства деформационного и вращательного движения жидкости в пределах этой элементарной частицы жидкости.

С позиций классической механики такая формализация означает, что на разных этапах вычислений используются не суммарные внешние воздействия на малые подвижные и деформируемые частицы жидкости, а лишь те, которые доступны в численных схемах разделения движения по физическим процессам, определяемым строго по линейным аппроксимационным законам. В данном случае подразумевается, что на первом этапе дифференцирование первого порядка для векторов смещений жидких частиц переопределяет их собственную кинематику, тогда аналогичное дифференцирование скоростей их перемещения позволит переопределить инерционные (силовые) свойства взаимодействия между исходными частицами

жидкости. В данном случае подразумевается, что скорости вычисляются по фиксированной сетке для центров масс жидких частиц, в то время как инерционные характеристики движения получаются в сильно деформированной сетке, образованной сместившимися частицами.

Вычислительные модели гидромеханики в каноническом представлении удобно формализовать с помощью линейных аппроксимирующих функций, точные физические величины которых определяются на разреженных узлах конечно-разностной сетки, охватывающей ограниченную область течения жидкости. Современная компьютерная логика позволяет обобщить разностные методы решения задач гидромеханики с помощью методов функционального программирования, традиционно используемого в системах искусственного интеллекта.

Для явного контроля физических процессов законы движения жидкости изначально представляются в жестких логических операциях трехмерной тензорной арифметики, оперирующих конкретными параметрами течения в размерном виде. Такой трехмерный тензорный аппарат формализует описание явлений гидромеханики именно для того случая, когда непрерывные функции определяются с помощью ограниченного количества не очень близко расположенных аппроксимирующих пространственно-временных точек.

Арифметические и логические формализации вычислительных объектов и процессов

Физические размерности являются естественным и наилучшим предикатом вычислительной формализации гидродинамических объектов. Такие же предикаты необходимы для фиксации типа системы отсчета и пространственной привязки к конкретной конечно-мерной частице жидкости. В комплексе вся система признаков-

предикатов необходима для автоматизированного распознавания и применения базовых функций трансформации элементарных объектов к требуемому расчетно-каноническому виду, с последующим применением конкретных гидромеханических моделей, и обратному преобразованию результатов к требуемой системе отсчета.

Элементарные объекты в специальной терминологии вычислительной математики должны быть определены в существенно более жесткой форме, позволяющей однозначно связать их с допустимыми компьютерными операциями. Подобно классическому тензорному анализу определим эти числовые объекты в одной из трех форм, соответствующих разностному описанию пространственных величин и сложных числовых объектов:

1) **СКАЛЯР** – числовая величина, не зависящая от системы отсчета, являющаяся либо инвариантом пространственно-временных преобразований, либо эмпирической величиной, формализующей реологические свойства жидкости. Скаляр может быть безразмерным, однако его использование допустимо только в операциях произведения, с любыми другими числовыми объектами;

2) **ВЕКТОР** – задает пространственно ориентированное внешнее воздействие или реакцию на него со стороны элементарной жидкой частицы. Векторные величины всегда связаны с конкретным пространственным базисом. Допускаются операции сложения для величин, измеренных в одной и той же системе отсчета и с одинаковыми физическими размерностями, а также операции умножения векторов на тензоры, в результате которых происходит замена или уточнение его опорного координатного базиса;

3) **ТЕНЗОР II РАНГА** – является производной величиной, характеризующей локальные свойства геометрических преобразований, или фиксирующей динамическое состояние элементарной жидкой частицы. Тензорные объекты можно интерпретировать в качестве про-

странственных базисов, которые хранят геометрию деформирующуюся жидкой частицы, и задают их локальную (внутреннюю) кинематику и конвективные свойства. Тензоры всегда участвуют в анализе динамических свойств и режимов течения реальной жидкости. Любые преобразования тензорных величин выполняются только в соответствии с логикой представления физических процессов и законов гидромеханики. Тензорные операции могут определяться чисто лингвистическими правилами языков программирования (*их внутренней семантикой*), что позволяет в процессе вычислительных экспериментов задействовать гибридные математические модели или параллельно использовать существенно различающиеся гидродинамические модели течения.

По физической сути **тензор II ранга** наиболее близко соответствует понятию **аффинора**, введенного в использование Людвигом Прандтлем в книге «Гидро- и аэромеханика» [1932], где тензором называлась только симметричная часть аффинора, а выделяемая антисимметрическая часть аффинора определялась в качестве вектора вращения.

Тензорные операции с элементарными объектами гидромеханики, их свойства и правила арифметических преобразований наиболее близко соответствуют принятым в книге Дж. Астарита и Дж. Маруччи «Основы механики неньютоновских жидкостей» [1978], от нотации и смыслового содержания которых здесь не делается существенных отклонений.

2.2. Определение цели, содержания и методологии проектирования вычислительного эксперимента

Воспользуемся обобщенным базисом троичной логики для формального представления объекта исследований, целью которого является изучение возможности комплексного решения задачи о про-

ведении вычислительного эксперимента в гидромеханике, где математический аппарат должен быть строго согласован с алгоритмическим описанием физических процессов, и обеспечивать эффективное (или автоматизированное) проектирование численных схем и алгоритмов для решения как прямых, так и обратных задач гидромеханики.



Рис.2.2. Логическое пространство проектной задачи о построении вычислительного эксперимента в гидромеханике

Сложные вычислительные эксперименты в гидромеханике не могут быть реализованы с помощью простых линейных повторений математических формул. Без следования теоретическим правилам при построении алгоритмов взаимодействия функций и процедур компьютерной программы, без строгого согласования форматов данных, определяющих элементарные вычислительные объекты, разработка сложного комплекса компьютерных программ может остановиться на невыносимо трудной отладке или неустранимых несоответствиях между вычислительными объектами и операциями. В отличие от изложения методов решения задач с использованием

естественных языков, при разработке сложных систем в языках программирования недопустимо даже малейшего отклонения от логических законов или упущений при формализации моделируемых физических процессов.

На рис. 2.2 представлено трехмерное логическое пространство, базисные плоскости которого образуют главные направления проектных исследований, которые должны быть в полной мере определены и представлены в виде единого комплекса логических связей, объектов и алгоритмов. Секторы, образованные градациями по направлениям, определяют внутреннее строение и условные названия конкретных этапов разработки, служебных программ, процедур и функций, определяемых на конкретных языках программирования.

Такой троичный базис позволяет согласовать противоречия при использовании встречных подходов к проектированию сложных логических систем. С этой целью противоречивые требования соотносятся между собой с позиций третьего - ортогонального и независимого от двух первых методологических подходов. С позиций такого третьего направления, названного к примеру: «Проект», могут быть согласованы (ортогонализованы) противоречия при представлении законов механики с использованием конкретных языков программирования. На самых верхних (дальних) уровнях в направлении «Проекта» должны решаться вопросы принципиальной возможности точного определения законов механики с использованием языков программирования, чем должно обеспечиваться не только их взаимное согласование, но также и должное развитие, устраниющее исходные противоречия. В этом случае, на среднем уровне будут согласованы противоречия в плоскости «Естественные законы», что обеспечит постановку прикладной физической задачи в терминах формализованной «Физической материи».

В результате полной проработки решаемой прикладной задачи, различные логические подходы должны привести к оптимальному проектированию программно-технического комплекса в целом, в котором исходные физические парадоксы и формальные противоречия должны образовать всесторонне согласованную среду для проведения прямых вычислительных экспериментов.

Пусть, к примеру, одним из ключевых понятий решаемой задачи будет выступить описание гидродинамических процессов вдоль оси «**Явление**», используемого по правилам «существенного» в предложении естественного языка, и ось-определение «**Развитие**» соотносимое с понятием «*процесса*» или «*действия*», – подобно глаголу. Тогда плоскость оси «**Проект**» будет выступать в роли логического поля для согласования свойств вычислительных объектов и алгоритмических операций в целом, определяя общую основу обоих подходов к численному решению конкретной прикладной задачи гидромеханики.

К логическому базису можно применять метафизические преобразования, аналогичные стандартным операциям тензорного анализа с учетом физических размерностей и соглашений об абсолютной и локальной системе отсчета. Полученные таким образом метафизические правила преобразования логических тензоров (матриц) могут быть использованы для разделения алгоритмов компьютерных вычислений на функциональные и декларативные методы программирования, в соответствии с требованиями по интерпретации исходных данных (существенных) и математических операций (глаголов).

По условиям проектирования «снизу-вверх» - направление от плоскости «**Проект-Развитие**», может быть изучена систематизация законов гидромеханики и тензорного анализа с позиций логики вычислительных операций. Это необходимо для формального определения

ления гидродинамических величин и объектов, базисов и пространства их существования и областей для определения числовых величин, которые должны быть связаны жесткими правилами тензорных арифметических операций и вычислительных алгоритмов для автоматических преобразований при изменении систем отсчета или физических размерностей. Реальные вычислительные модели и их свойства могут быть изучены в соответствии с другим ортогональным (независимым) направлением исследований, которое будет привязано к оси матрицы: «Развитие-Явление», и на котором строится обоснование достаточности аргументов (исходных условий) при теоретическом обосновании нового математического аппарата вычислительной гидромеханики. Ось «Явление-Проект» может быть ассоциирована с изучением специализированного языка программирования для решения задач вычислительной гидромеханики, который должен быть спроектирован и реализован для наиболее эффективного использования законов и математических принципов formalizованных в двух других ортогональных плоскостях (независимых направлениях исследований), в рамках единого троичного логического базиса (настоящего исследования).

Плоскость «**Язык компьютерных вычислений**» находится в стадии перспективного проектирования, являясь источником и целью излагаемой далее «**Трехмерной тензорной математики вычислительных экспериментов в гидромеханике**», поэтому данный вопрос должен включать три подраздела, образующих диагональную или каноническую матрицу исходного проекта. Каноническая - в данном случае означает, что логическая матрица построена в идеализированном или собственном базисе для исследования проекта тензорного языка программирования. На практике поиск таких упрощенных условий может быть начат с эвристических начальных предположений для реализации процедур «прямого хода» проекта,

который должен методично корректироваться за счет «обратного решения», означающего дальнейшую детализацию и - формализацию условий, необходимых для построения новых методов практической реализации вычислительных экспериментов в гидромеханике.

Особенности языковой среды программирования

Для определения языковой среды программирования можно воспользоваться обобщенными смысловыми понятиями [Уинстон, 1980], что позволит проводить аналогии с естественным мышлением при анализе новых проектных решений. Формально и упрощенно разделим программные процедуры на «алгоритмические» - имеющие неизменный программный код, бесконтрольно применяемый к любым числовым данным, и – «функциональные» - в которых исполняемый код автоматически адаптируется под особенности представления исходных данных, которые имеются в компьютерной памяти на момент исполнения процедуры.

Алгоритмический язык. Может быть представлен как запись командных или определяющих предложений, которые имеют однозначный смысл, существенный порядок слов и неизменную форму в процессе выполнения компьютерной программы. К алгоритмическим языкам относятся все общедоступные языки программирования, такие как Fortran, Pascal, С и С++. Базовыми операциями этих языков являются определения и преобразования числовых данных, управляемые линейными алгоритмами. Если фрагмент текста программы оформляется в виде отдельной процедуры, то внутренние числовые данные временно располагаются в стековой памяти или образуют статические поля собственных переменных, прямо влияющих на ход вычислений. Таким образом, несмотря на жесткое сохранение формы языковых конструкций, в процессе выполнения

программы присутствует сильнейшая контекстная зависимость для всех слов языка программирования, а нередко и для всех процедур и функций внутри конкретного программного комплекса.

Главное достоинство алгоритмических языков программирования – это прямое отображение командных предложений на аппаратные средства конкретной ЭВМ, что позволяет целенаправленно оптимизировать наиболее критичные фрагменты программного кода для достижения наибольшей эффективности вычислений.

Функциональный язык. На функциональном языке программирования записываются предложения со строго определенным или уникальным физическим смыслом, исполнение которых всегда оперируют исходными данными с контекстно-зависимым содержанием. Построение такой языковой среды необходимо для прямой записи законов гидромеханики, в форме максимально приближенной к аналитическому представлению прикладной задачи в терминах естественного физико-математического мышления. В простейшем случае представление такой программной среды может быть выполнено в виде «языковой оболочки» над алгоритмическими исполняющими процедурами.

Вычислительный эксперимент в гидромеханике всегда означает манипулирование большими объемами строго систематизированных числовых данных. Поэтому организация числовых структур должна служить связующим звеном между алгоритмическими «глаголами» и функциональными «определителями». Следовательно, все числовые объекты должны содержать не только текущие расчетные величины, но и информация об описываемом физическом явлении; ссылки на отсчеты времени и пространственные координаты; а также дополнительные «признаки», задающие допустимые методы трансформации и физической интерпретации числовых данных в любой момент времени проведения вычислительных экспериментов.

По аналогии с термином: «признак» для числовых данных, можно ввести термин: «образец», применяемый к исполняемым процедурам и функциям, который будет характеризовать исполняемую процедуру по правилам интерпретации данных и допустимым методам ее автоматического использования. Этого достаточно для формирования управляющего языка, где слова служат определителями смысловых или физических терминов, к которым всегда связаны описательные «признаки» и исполнительные «образцы». Формально можно ввести понятие «базы знаний», где использование слов определяется их внутренним смыслом и связями с текущим состоянием языковой или исполнительной среды.

Двухуровневое расслоение языковой среды позволяет ограничить алгоритмический подход использованием только локальных данных, что необходимо также для обеспечения множественной ре-ентерабельности всех исполняемых модулей в многозадачном режиме, поддерживая управление ходом вычислительного эксперимента и контроль всех числовых массивов на функциональном уровне.

Среда программирования на основе языка C++

Для иллюстрации особенностей среды программирования воспользуемся базовыми конструкциями языка C++, обладающего наилучшими способностями к прямому отображению аппаратных особенностей цифровых ЭВМ, и в то же время имеющего мощные препроцессорные средства для обобщения вычислительных операций и расширения функциональных возможностей как самого языка, так и его объектно-ориентированной среды.

Язык программирования C++ является полноценным классическим компилятором, поэтому динамическое (т.е. в ходе выполнения программы) управление выбором процедур и функций принципиально невозможно. Однако на этапах компиляции в качестве упоми-

наемых выше образцов могут выступать невидимые для разработчика расширители имен процедур, формируемые из списков используемых параметров.

Для описания физико-механических свойств течения жидкости, на уровне компилятора должны быть построены три типа элементарных вычислительных объекта.

1. Скалярные числовые данные, которые служат для задания инвариантных характеристик течения
2. Векторные величины определяют точку в пространстве:
3. Элементарная (*крупная*) частица жидкости имеет малые, но конечные пространственные размеры, и может быть определена с помощью тензора.

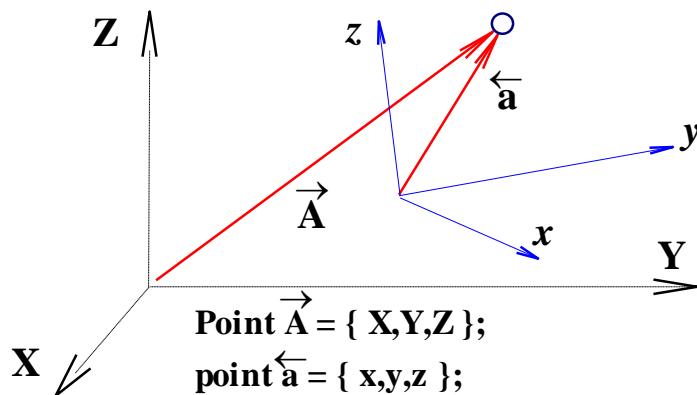


Рис. 2.3. Программное и пространственное представление вектора точки.

Предметом тензорных вычислительных операций является тетраэдр базисных векторов (рис. 2.3), связывающих пространственный параллелепипед элементарного числового объекта, внутри которого все кинематические параметры течения и свойства жидкости изменяются строго по линейным законам. Гидродинамические расчеты в таком параллелепипеде сводятся к линейным интерполяционным процедурам, при которых исходные локальные базисы образованы простыми единичными векторами. В случае же свободных границ, и особенно - подвижных, а также на нерегуляризованной расчетной сетке, тензорные определения элементарных частиц становятся

недоопределенными или вырожденными, что требует применения экстраполяционных расчетов граничных условий, обладающих более высоким порядком разностного дифференцирования, и которые могут быть реализованы исключительно путем применения функциональных методов программирования, нередко поднимающихся до уровня языковой среды искусственного интеллекта.

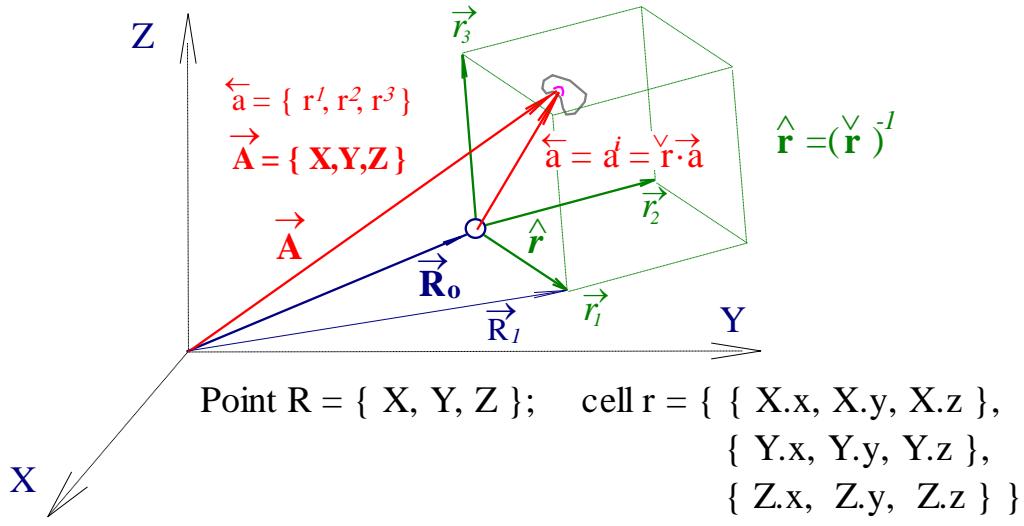


Рис. 2.4. Программное и пространственное представление элементарной частицы жидкости

В приведенном определении тензора формы элементарной частицы жидкости использованы три базисных вектора, каждый из которых имеет собственные предикаты-признаки, однозначно определяющие как собственные пространственные привязки, так и физические особенности этих векторов. Это необходимо для автоматизации проектирования и построения прикладных вычислительных экспериментов, позволяя на языке высокого уровня определять только основные законы гидромеханики, а согласование координатных систем и физических размерностей будет выполняться автоматически частично при компиляции программных модулей, и в процессе контроля расчетов на этапах проведения вычислительного эксперимента.

Вычислительные операции с элементарными жидкими частицами и их физическая интерпретация

Все вычислительные объекты не могут ни создаваться, ни уничтожаться в результате математических операций в процессе проведения вычислительного эксперимента. Все расчетные объекты могут создаваться либо при начальной подготовке исходных гидродинамических полей, либо создаваться с помощью специальных логических процедур, способных на функциональном уровне управлять ходом проведения вычислительного эксперимента.

К основным действиям по моделированию внутренней динамики жидких частиц относится математическая операция произведение, которая в тензорных определениях применима к векторным величинам при условии, что все компоненты сомножителей измерены вдуally противоположных базисах. Формально это означает запрет повышения ранга тензорных величин с помощью операции умножения. То есть все операции умножения должны носить исключительно интерполяционный характер, суть которого состоит в линейном перераспределении характеристик течения между смежными элементарными частицами жидкости.

В индексной и тензорной форме динамика несвободной частицы жидкости будет определяться с помощью векторного закона:

$$F_i = M_i^j \cdot W_j \quad \text{или} \quad \vec{F} = \overset{>}{M} \cdot \vec{W},$$

который означает, что внешняя сила \vec{F} , действующая на выделенную из потока крупную частицу жидкости M , вызывает реакцию W , величина и направление которой зависит как от внутреннего состояния (*инерции*) этой частицы, так и от ее способности деформироваться, поглощать или усиливать внешние проявления энергии движения. Жидкая частица будет двигаться в соответствии с традиционным законом Ньютона для точки со скалярной массой только в

том случае, если ее освободить от связей с окружающей сплошной средой.

Связывая тензор массы $\overset{>}{M}$ с формой частицы жидкости, получим определение внутренней для плотности, которая в общем случае придает жидкой среде анизотропные свойства:

$$\vec{F} = r_{ik} \cdot \rho^{kj} \cdot \vec{W} = \hat{r} \cdot \overset{\vee}{\rho} \cdot \vec{W},$$

где: \hat{r} – тензор формы крупной частицы жидкости;

$\overset{\vee}{\rho}$ – тензор внутреннего состояния частицы жидкости, условно понимаемый как оператор, учитывающий силовое взаимодействие малого расчетного элемента с окружающей сплошной средой.

По сути введенных понятий и условных обозначений вполне достаточно для построения прикладных вычислительных экспериментов в гидромеханике. Продекларируем эти обозначения:

Прописными буквами обозначаются величины, измерены в абсолютной системе координат, при этом пространственные векторы могут быть соизмеримы с расстоянием до начала координат;

Строчными буквами обозначаются гидродинамические характеристики течения, справедливость которых обоснована только внутри жидкой частицы жидкости или в непосредственной близости от нее.

Тогда:

$\vec{A} = A_i$ – пространственная точка (вектор), измеренная и отмеченная в глобальной системе координат [м];

$\overset{\leftarrow}{a} = a^j$ – векторный отсчет, приведенный к локальному базису элементарной частицы жидкости [m^{-1}];

$\hat{r} = \vec{r}_i = r_{ik}$ – базисный тензор, определяющий форму крупной частицы жидкости [m^3];

$\overset{\vee}{\rho} = \overset{\leftarrow}{\rho}^j = \rho^{kj}$ – тензор характеристик внутреннего динамического состояния элементарной расчетной частицы жидкости [$k\cdot m^3$];

$\overset{>}{m} = m^i_j = \overset{\vee}{\rho} \cdot \hat{r}$ – смешанный тензор, соотносящий внутреннее состояние частицы жидкости на абсолютную систему отсчета [кг];

Вычислительный эксперимент в гидромеханике обобщенно можно представить как процесс трансформации поля скорости во времени: ${}^+\vec{V} = \vec{V} + \vec{W} \cdot t$, где: t – малый расчетный интервал времени.

Уточнение нового поля скорости ${}^+\vec{V}$ является вторым шагом дифференцирования первого порядка, завершающего исполнение закона Ньютона для уравновешивания внешних сил соответствующими приращениями скорости свободного движения частиц жидкости.

Построение вычислительного эксперимента именно таким образом, чтобы все операции сводились не более чем к разностному дифференцированию первого порядка, является главной особенностью Лагранже-Эйлерова подхода при численном решении задач гидромеханики. Иначе этот подход можно назвать методом расщепления решения по физическим процессам, который может быть сформирован тремя условными этапами численного решения прикладной задачи:

1 этап. По текущему полю скорости уточняется состояние крупных частиц жидкости на следующих момент времени:

$${}^+\hat{\vec{M}} = (\hat{\vec{r}} + \hat{\vec{v}} \cdot t) \cdot \hat{\rho},$$

где: $\hat{\vec{v}}$ – тензор отображения текущего поля скорости на локальный базис крупной частицы; $\hat{\rho}$ – тензор внутреннего состояния жидкой частицы на текущий момент времени.

2 этап. После уточнения результирующего вектора всех внешних сил, действующих на крупную частицу жидкости, производится расчет нового поля скорости:

$${}^+\vec{V} = \vec{V} + \vec{F} \cdot {}^+\vec{M}^{-1} \cdot t.$$

В данном выражении тензор массы оказывается в знаменателе, что позволяет его идентифицировать как условную гидродинамическую особенность, оказывающую влияние на течение жидкости, при этом в случае модели идеальной жидкости такое влияние будет рас-

пространяться не только на смежные частицы, но и на весь поток жидкости в целом.

3 этап. В результате выполнения первых двух этапов произойдет пространственное смещение всех крупных частиц жидкости, а новые гидродинамические поля отчасти перестанут удовлетворять условиям неразрывности и изотропности исходной среды. В зависимости от типа задачи, на заключительном этапе необходимо вносить релаксационные поправки к внутренним свойствам и условиям взаимодействия между частицами жидкости, а также проводить сквозной контроль качества решения и, при необходимости, применять схемы для адаптации или эмпирической подмены решений в зонах, где вычислительная модель дает заведомо неверные результаты.

Так, например, для получения тензора конвективных скоростей, входящего в уравнение движения на неподвижной сетке по Эйлеру, достаточно произвести нормировку тензора локальных скоростей:

$$(\hat{r} + \hat{v} \cdot t) \cdot \hat{r}^{-1} = \overset{>}{I} + \overset{>}{v} \cdot t,$$

после чего он станет независимым от собственного локального базиса и позволит обобщить поле скорости на ближайшие или смежные частицы жидкости и, в процессе обратной интерполяции восстановить тензор плотности $\overset{\vee}{\rho}$ к исходному виду, либо аккумулировать в нем условную внутреннюю энергию и дополнительные напряжения, возникающие за счет вязкости, сжимаемости и упругости в сплошной среде:

$${}^+\overset{\vee}{\rho} = \overset{\vee}{\rho} + \overset{\vee}{f} \cdot t,$$

где: $\overset{\vee}{f}$, в пересчете на смежные частицы, будет определять действующие извне силы.

Границные условия и критические режимы течения, независимо от методов постановки вычислительного эксперимента, всегда отмечаются недостатком информации для интерполяционного перестроения характеристик частиц и смежных полей жидкости. В этом слу-

чае используются специальные алгоритмы для асимптотических или эмпирических упрощений, и численных методов экстраполяции расчетных параметров на недостающие грани жидкой частицы. Выбор и исполнение таких алгоритмов может происходить только на уровне функционального языка программирования, обеспечивающего контроль численных расчетов и управление вычислительным экспериментом в целом.

Для полной реализации Лагранже-Эйлерова подхода нет необходимости построения криволинейных координатных сеток, так как деформационные характеристики гидродинамических полей полностью учитываются внутренними энергетическими характеристиками элементарных частиц жидкости, исходная форма которых на каждом такте вычислений по времени может сводиться к обычной прямоугольной Эйлеровой сеточной области.

Построение числовых массивов для моделирования пространственных гидродинамических полей

При использовании криволинейных систем координат, есть возможность наиболее качественного и повсеместного согласования пространственных аппроксимационных критериев, что фактически будет означать сведение всех уравнений механики к каноническому виду, обеспечивающему, к тому же, автоматическое выполнение граничных условий, и в том числе на открытых границах расчетной области. Однако, обеспечение столь идеальных условий для построения вычислительных моделей в механике сплошных сред будет означать фактическое решение задачи чисто аналитическими методами, и потому возможно только в случае идеальных или искусственно подобранных расчетных областях.

В прикладных же задачах, решаемых в произвольных или сложных геометрических и физических условиях, построение криволи-

нейных и ортогональных сеточных областей становится невозможным. При частичном решении такой геометрической задачи, она сводится к использованию косоугольных ячеек на нерегуляризованных узлах, что не дает никаких, ни теоретических, ни вычислительных преимуществ по сравнению с обычными прямоугольными Эйлеровыми координатными сетками, которые, при необходимости, могут иметь переменный шаг или становиться нерегуляризованными.

Важным преимуществом прямоугольных расчетных сеток является то обстоятельство, что, по крайней мере, на одном из этапов гидродинамических расчетов, форма элементарных частиц жидкости будет представляться ортогональными или даже диагональными тензорами II-го ранга, что значительно упростит форму представления законов механики, и исключит недостаточную обусловленность вычислительных операций из за сильных начальных деформаций сеточных ячеек.

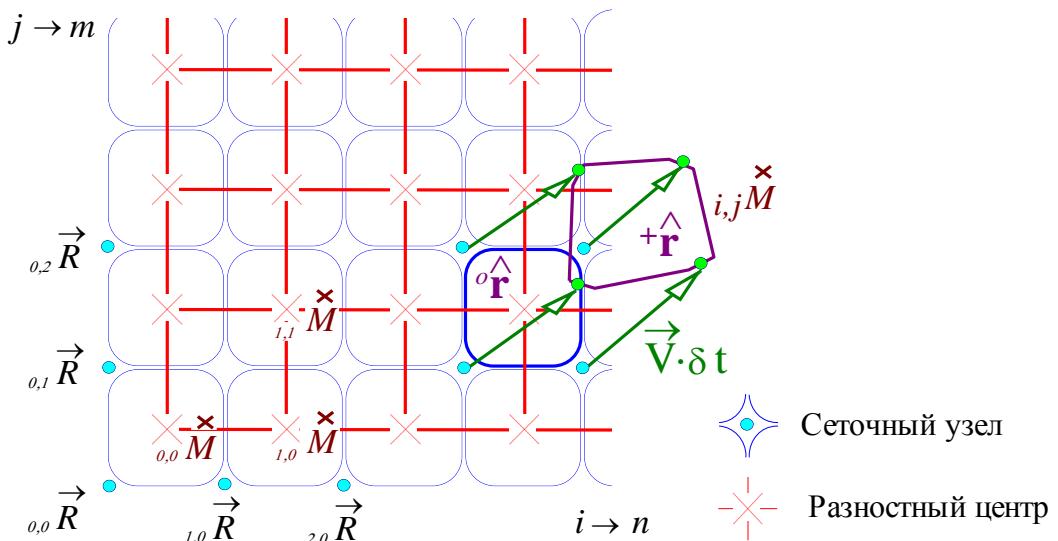


Рис. 2.5. Прямоугольная регуляризованная сеточная область.

Правые тензорные индексы используются для отметки пространственных компонент, характеризующих внутренние свойства элементарных числовых объектов в связанной с ними локальной системе координат:

$$\hat{r} = \vec{r}_k = r_{ik}.$$

Левыми нижними индексами будем отмечать местоположение этой частицы в абсолютном пространстве по номерам расчетных узлов (рис. 6):

$${}_{ij}\hat{r} = \hat{r}({}_{iX}, {}_jY),$$

где локальный базис ${}_{ij}\hat{r}$ связывается с координатами $X=i\cdot x$, $Y=j\cdot y$.

Тогда *левый верхний индекс* можно использовать для отметки расчетных шагов во времени:

$${}^k\vec{R} = \vec{R}({}^0T + k \cdot t); \quad {}^+r = {}^{k+1}\hat{r}.$$

Иногда, для упрощения записи, индексными отметками: *минус* "–" и *плюс* "+", будем отмечать смежные в пространстве ячейки или предыдущий и последующий расчетные шаги во времени, соответственно:

$${}_{+}{}^+M = {}_{i+1,j+1}{}^{k+1}\hat{M}.$$

Построение прямых вычислительных экспериментов в гидромеханике может быть основано на непротиворечивом проектировании интерполяционных процессов в пространстве и во времени, при которых на каждом такте вычислений будет происходить согласование моделируемых законов механики, поочередно относимых к границам элементарных расчетных ячеек (Эйлеров этап) и к образуемым этими ячейками крупным частицам жидкости, участвующим как бы в свободном движении с внутренними деформациями (Лагранжев этап).

Главными особенностями таких интерполяционных операций, формально образующих привычное разностное дифференцирование физических полей для моделирования гидродинамических процессов на сеточных расчетных областях являются:

1 – результат разностного дифференцирования первого порядка всегда смещается в пространстве с узлов расчетной области, в кото-

рых определены исходные значения параметров пространственного поля, на центры масс условных расчетных ячеек, ограниченных этими узлами. Если разностное дифференцирование второго (*четного*) порядка не тривиально, то ему также присуще аналогичное, но меньшее смещение результирующей точки (рис.6).

2 – при прямом моделировании нестационарных течений все приращения характеристик течения во времени необходимо относить на смещенные в пространстве ячейки жидкости. Такие смещения всегда соизмеримы с размерами расчетных ячеек и потому в инженерных приложениях не могут быть ни названы малыми, ни проигнорированы.

3 – в явной или неявной форме разностные расчетные схемы первого порядка для аппроксимации гидродинамических полей самоцентрируются. Достигение корректности и надежности вычислительных экспериментов возможно только при изначальном управлении процессами такого центрирования, направленного на приведение вычислительных операций к схемам «прогноза и коррекции», что особенно важно при построении граничных условий и в случае динамического внесения внешних возмущений в исполняемую вычислительную модель.

Вычисления значительно усложняются вблизи открытых и жестких границ, а также в зонах нарушения режимов течения, связанных с образованием кавитационных разрывов, свободных поверхностей и вихревых нитей.

В частности, при решении задач гиперболического типа, к которым относится моделирование длинноволновых процессов в океане, третий этап практически полностью исключается за счет предварительного аналитического подбора весовых коэффициентов систем дифференциальных уравнений, а именно – заданием фазовой скорости распространения волн: $C=\sqrt{gh}$. Но даже для столь простого вы-

числительного эксперимента на согласующем этапе расчетов остается сложнейшая проблема качественного согласования граничных условий. Это объясняется еще и тем, что на втором этапе вычислений из интерполяционных процедур выпадают все граничные точки: $\vec{R}_{0,j}$ и $\vec{R}_{i,0}$ и на противоположных границах. В общем случае восстановление расчетных величин на границах возможно путем экстраполяции решений из внутренней области, что реализуемо только при условии отсутствия гидродинамических особенностей вблизи границ и гладкости внутренних гидродинамических полей.

Любые гидродинамические расчеты сводятся к аппроксимации монотонно изменяющихся физических параметров течения жидкости на дискретных узлах расчетной сетки. В задаче о распространении длинных волн в океане и в его прибрежной зоне возможно точное аналитическое предсказание характерных масштабов исходных гидродинамических процессов. В результате аналитического решения для скорости распространения длинных гравитационных волн $C=\sqrt{gh}$ и дисперсионным условием, не допускающим зарождение волн с периодом меньше исходного, сеточная область может быть адаптирована под минимальную длину моделируемых волн, с более частой сеткой вблизи берегов и многократно увеличенной на больших глубинах открытого моря.

Такая адаптация сеточной области позволит многократно уменьшить объемы используемой оперативной памяти и значительно повысить общую скорость вычислений. Но в этом случае невозможно использовать простые циклические алгоритмы для расчетов на регуляризованных сетках, так как все разорванные узлы становятся подобны свободным границам, на которых для восстановления величин в разорванных узлах необходимо активно использовать экстраполяционные методы.

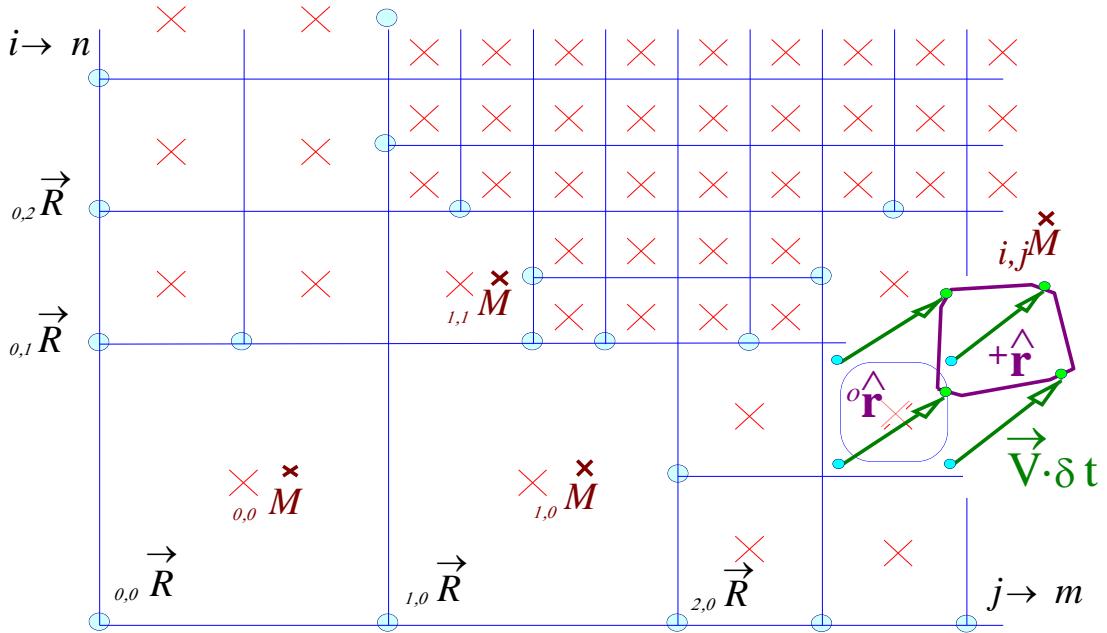


Рис. 2.6. Прямоугольная нерегуляризованный сеточная область.

Если предварительное определение параметров расчетной сетки невозможно, то для построения эффективных вычислительных экспериментов необходимо непрерывно оценивать интенсивность в узлах расчетной сетки и внутренние напряжения в элементарных частицах жидкости, дробя или сливая расчетные ячейки в соответствии с особыми критериями. В программной реализации динамическая адаптация расчетной сетки может выполняться рекурсивными методами, например по критериям превышения кривизны пространственных полей, или при необходимости замедления расчетного шага в конкретной ячейке по критериям устойчивости численного решения.

На рис. 2.6. показано, что при использовании нерегуляризованных сеток внутренние разрывы появляются непредсказуемо и почти хаотично. Тем не менее, в инженерных приложениях только неравномерные сетки позволяют повсеместно удовлетворить аппроксимационные критерии и минимизировать негативное влияние чисто сеточных эффектов, связанных с проявлением неконтролируемой вязкости, упругости и сжимаемости жидкости. В информационном же плане решение задачи превращается в непрерывное исследование

ближайшего окружения всех крупных частиц жидкости, сводящееся к экстраполяционному восстановлению физических параметров жидкости как в динамически формируемых частицах жидкости, так и в разорванных узлах сеточной области. В таком случае построение вычислительного эксперимента может опираться только на функциональные методы программирования, с глубоким использованием поисковых алгоритмов и рекурсивно подстраивающихся под свойства течения процедур, способных обеспечить уточненные гидродинамические расчеты как в областях с наибольшей интенсивностью деформации на внутренних фронтах, так и в локальных зонах с повышенной концентрации энергии вблизи особых гидродинамических точек.

2.3. Построение программных алгоритмов для изучения длинноволновой динамики уровня моря

Для полной реализации описанного метода проектирования вычислительного эксперимента необходима, как минимум, следующая программная поддержка:

1 - Компилятор алгоритмического языка, включающего динамически определяемые данные и операции. Поддержка процедур должна обеспечивать распознавание типов для параметров, процедуры – функции должны возвращать в качестве результата массивы и структуры данных или другие функции с их описателями (=образцами). Такой язык должен стать оболочкой для функциональной системы программирования. Его назначение – прямое управление процессом проведения вычислительного эксперимента;

2 - Функциональная среда программирования, включающая обработку динамических структур данных и списков, и поддерживающая рекурсивные методы формирования и распознавания процедур-

функций. Разработка функциональной среды становится делом реализации самого вычислительного эксперимента.

Логическая структура обобщенного программного комплекса

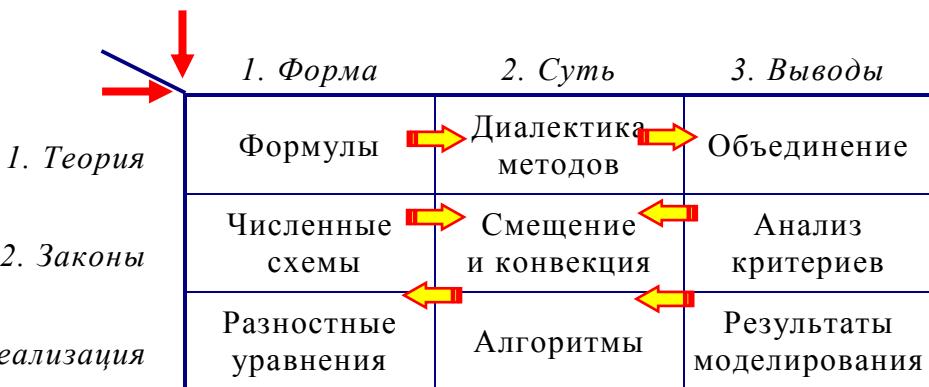


Рис. 2.7. Вариант получения разностно-тензорных уравнений путем интерпретации современных численных методов для решения задач теории длинных волн.

Приведенная на рис. 2.7 схема построения вычислительного эксперимента может быть представлена в виде трех уровней аппаратной и языковой поддержки различных методов программирования, создаваемых по принципу от «множества расчетных алгоритмов» к «унифицированной функциональной среде», ориентированной на внутренний контроль и согласование реологических свойств жидкости, и автоматизированную численную реализацию законов механики сплошной среды.

По диагонали матрицы (рис.2.7) показаны ключевые объекты, которые рассматриваются при проектировании прямых вычислительных экспериментов в гидромеханике:

1.1. – Алгоритмический уровень. Описание расчетной области в единой системе координат. Построение всех вычислительных объектов и однозначное связывание их физических и кинематических свойств в рамках общей сеточной области;

2.2. – Функциональный уровень. Построение строгих математических функций для удовлетворения всех запросов к элементарным вычислительным объектам и их пространственным взаимосвязям с ближайшими частицами сплошной среды;

3.3. – Уровень моделирования. Реализация конкретных вычислительных моделей, обеспечивающих моделирование гидродинамических процессов при заданных начальных условиях и внешних граничных или объемных возмущениях, необходимых для моделирования реальных физических явлений.

На практике, на каждом из уровней (*слева-направо по строкам матрицы, рис. 2.7*) создаются комплексы специализированных процедур, в основу которых закладывается одинаковая программная среда:

1. Алгоритмический пакет процедур нижнего уровня

1.1 – статические форматы исходных данных и результатов вычислений, а также утилиты низкого уровня для их представления в расчетах;

1.2. – динамические формируемые расчетные объекты и системы процедур для их построения, трансформации и возврата новых данных в исходные статические поля гидродинамических параметров;

1.3. – комплекс утилит для перерасчета всех гидродинамических параметров между используемыми системами координат, в том числе используемые для интерактивного представления вычислительных процессов и текущих результатов на графическом экране ЭВМ.

2. Функциональная среда разработки моделей гидромеханики:

2.1. – представление всех вычислительных объектов и гидродинамических полей в виде комплекса специальных процедур (в терминах C++ - классов), образующих функциональную среду для разработки прямых численных экспериментов;

2.2. – логическая система и ее препроцессорное обеспечение для связывания различных числовых объектов, в том числе учитывающих необходимость преобразования систем координат, физических размерностей и автоматического применения экстраполяционных методов, при нехватке исходных данных;

2.3. – интеграция во все числовые объекты дополнительных функций, позволяющих деформировать их пространственные и физические характеристики в зависимости от скалярного параметра – времени. Главной особенностью этой логической системы для связи пакетов исполнительных алгоритмов, являются дополнительные процедуры контроля изменения режимов течения, обеспечивающие автоматическое применение гибридных схем в зонах изменения режимов течения.

3. Построение гидродинамических экспериментов:

3.1. – разработка методов связывания вычислительных объектов для реализации конкретного вычислительного эксперимента, в том числе с помощью глобальных списков параметров для реализации вычислительного эксперимента в целом;

3.2. – разработка сценариев выборки исходных данных, преобразования их во внутренние форматы численного моделирования и с целью непрерывной визуализации всех вычислительных процессов и результатов расчета на графического экране ЭВМ;

3.3. – создание интерактивной среды и графического окружения для постановки, проведения и анализа текущих результатов непосредственно в процессе проведения вычислительных экспериментов.

В полной мере приведенная структура программного комплекса применима, конечно же, только в случае проведения прямых вычислительных экспериментов в гидромеханике, при которых все численные схемы для решения систем дифференциальных уравнений могут быть выражены в явной форме, когда каждая расчетная опе-

рация сопоставлена с моделируемыми физическими процессами и при необходимости скорректирована для получения достоверного гидродинамического решения.

Моделирование длинноволновых процессов в океане в полной мере соответствует указанным упрощающим условиям, и потому представляется наиболее интересной задачей для теоретической и программной отработки методов проектирования и создания прямых вычислительных экспериментов.

Особенности реализации вычислительного эксперимента для моделирования длинных волн на мелкой воде

Рассмотрим примеры получения известных аналитических соотношений длинноволновой гидродинамики и критериев существования решения, изначально ориентированных на построение демонстрационного алгоритма, с использованием которого можно на практике проанализировать различные методы программирования.

1.1. Формулы. В предыдущих разделах рассматривались общие вопросы проектирования и постановки вычислительного эксперимента. Определены гидродинамические объекты и операции, которые однозначно описываются с помощью современных средств программирования для цифровых ЭВМ. Было введено скалярное определение плотности жидкости в виде коэффициента пропорциональности между внешней массовой силой и ускорением контрольных точек среды.

Последнее позволяет провести аналогичный геометрический анализ численных методов для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, пусть это будут уравнения длинных волн.

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + g \frac{d\eta}{dr} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial \vec{r}} \right) = 0 \quad (22)$$

где: $H = \eta \cdot D$ - полный уровень моря; $\vec{U} = \vec{V} \cdot \vec{H}$ - поток жидкости.

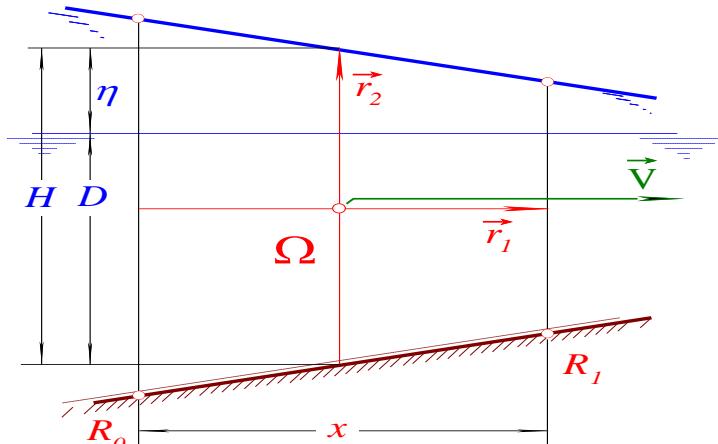


Рис. 2.8. Локальная геометрия длинноволнового движения жидкости.

Математическая модель, составленная из уравнений (21) и (22) определена в одной, в данном случае абсолютной или Эйлеровой системе координат, соответственно метод решения называют Эйлеровым.

В Лагранжевом подходе уравнение (21) применяется к дискретным точкам, «вмороженным» в жидкость. Уравнение неразрывности в этом случае должно быть заменено соотношением, определяющим взаимные правила движения таких Лагранжевых точек. Например, для условия сохранения объема:

$$\det(\hat{r}) = const \quad (23)$$

где: $\hat{r} = r_i$ - симплекс базисных векторов, соединяющих смежные точки.

Уравнение движения для линейной теории длинных волн записывается в форме аналогичного векторного дифференциального уравнения, но только в частных производных, и отличается от записи полного уравнения движения (21) отсутствием конвективных со-

ставляющих движения даже в малых объемах моделируемого течения жидкости:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial \vec{r}} = 0, \quad (24)$$

формально это означает, что в процессе вычислений частица жидкости считается неподвижной.

1.2. Диалектика методов. Опираясь на известные численные методы [Белоцерковский, 1982; Марчук, 1983], можно выделить три основных подхода к построению вычислительной модели:

- 1) решение в Эйлеровых координатах;
- 2) решение в Лагранжевых переменных;
- 3) смешанный Лагранже-Эйлеров подход или «Метод крупных частиц».

Динамическое уравнение для всех трех подходов определяется одинаково, в обобщенном случае это закон движения в форме Ньютона. Различие же методов связано с различием в представлении деформационных свойств жидкости.

Первый подход – решение в Эйлеровых координатах, характеризуется наибольшим математическим формализмом. Здесь математическая модель имеет строгую формулировку и представляется в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. При решении практических задач исходная математическая модель существенно усложняется, особенно при постановке сложных граничных условий, характерных для моделирования гидродинамических процессов в реальных морских акваториях.

Второй подход – решение в Лагранжевых переменных, принципиально отличается от первого тем, что уравнение движения применяется к некоторым свободным точкам, которые интерпретируются как «вмороженные в жидкость». Здесь, после явного применения динамического уравнения, на втором этапе расчетов производится

согласование условий сохранения массы, энергии и количества движения. Основным достоинством Лагранжевой расчетной схемы является принципиальная возможность моделирования сложных течений с произвольными границами, фактически превращая расчеты в классический вычислительный эксперимент с согласованием всех расчетных уравнений чисто инженерными методами. Главный недостаток – это требование огромных вычислительных ресурсов, а также отсутствие уверенность как в корректности моделирования гидродинамических процессов, так и в устойчивости численных схем.

Третий подход можно представить как обобщение двух первых. Если проводить такое обобщение с целью построения решения на минимальных машинных ресурсах, то основная идея метода сводится к следующему:

- жидкость рассматривается как совокупность крупных Лагранжевых частиц, которые участвуют в свободном движении;
- эти частицы имеют конечные размеры и определяются в виде тензора формы совместно с деформациями;
- внешние силы интерпретируются как массовые и распределенные по всему объему такой крупной частицы.

В такой гидромеханической модели уравнение движения может быть обобщено таким образом, чтобы реакция на действие внешних сил определяла не только изменение вектора количества движения всей частицы, но и оказывала влияние на ее деформацию. Это будет означать, что каждая из крупных частиц имеет гидродинамические особенности в виде вихреисточника и диполя, интенсивность которых будем называть некоторой внутренней энергией, оказывающей влияние на действие внешних сил. При этом под внешними силами можно понимать не полную результирующую силу, а, например, только градиент давления, или какую-либо другую объемную величину, которая доступна на конкретном этапе вычислительного экс-

перимента, в том числе получаемых с целью адаптации расчетной модели к оперативным наблюдениям за текущим состоянием морских акваторий.

1.3. Объединение. Этапы проведения вычислительного эксперимента могут быть описаны следующим образом:

1) Расчет нового местоположения и скорости для каждой крупной частицы, при этом тензор деформации будет влиять на величину изменения количества движения. Такое влияние будет учитывать предысторию рассогласований внешних сил с реакциями.

2) Пересчет тензора формы и деформации крупной частицы, путем удовлетворения локальных законов движения жидкости. Фактически здесь рассматривается взаимное влияние смежных частиц жидкости.

3) Удовлетворяются условия сохранения массы, энергии и количества движения для всей расчетной области. При этом расчетные величины могут быть интерполированы со смещенных Лагранжевых узлов на исходную Эйлерову сетку.

2.1. Численные схемы. Пусть алгоритмическая модель будет построена так, что на первом этапе рассчитывается новое поле скорости:

$${}^{k+1}\vec{V} = {}^k\vec{V} + \vec{F} \frac{\delta t}{\rho} = {}^kV_i - g \frac{{}^k\partial\eta}{{}^k\partial x^i} \quad (25)$$

тогда поле уровней моря η будет выступать в качестве свободного скалярного параметра, с помощью которого согласуется условия неразрывности на втором этапе расчетов:

$${}^{k+1}\eta = {}^k\eta + \frac{\partial(V_i H)}{\partial X_i} \cdot \delta t \quad (26)$$

Применяя Лагранжев подход, учтем перемещение узлов, ограничивающих крупную частицу жидкости Ω :

$${}^{k+1}\vec{R} = {}^k\vec{R} + {}^kV \cdot t + \vec{F} \frac{t^2}{2\rho} = {}^kR_i + {}^kV_i \cdot t - \frac{g}{2} \frac{{}^k\partial\eta}{\partial x^i} \cdot t^2 \quad (27)$$

Здесь поле скорости (25) определяется на подвижных узлах расчетной сетки $\{R\}$ и таким образом снимается допущения линейной теории. Условие сохранения объема (23) может быть записано в явном виде

$${}^{k+1}H = \frac{{}^kx \cdot {}^kH}{{}^{k+1}x}. \quad (28)$$

Вычислительная модель, составленная из уравнений (25), (27), (30), соответствует совместному использованию Эйлерова и Лагранжевого подходов, где поле внешних сил рассчитываются в глобальной системе отсчета, а поле скорости определяется на подвижных узлах сетки.

2.2. Смещение и конвекция. Если провести линейную интерполяцию скорости на исходную сеточную область, то будет получено дополнительное слагаемое для уравнения движения (4), которое будет определять конвективную составляющую течения:

$${}^{k+1}V = {}^kV - g \frac{d\eta}{dx} t + \frac{V(R_1) - V(R_0)}{x} t. \quad (29)$$

Выражение (29) определяет поле скорости в глобальной системе отсчета и в общем случае соответствует нелинейной теории длинных волн. Практическое же использование последнего выражения ограничено из-за повышенного порядка пространственной аппроксимации. Физические свойства жидкости по сути своей локальны и тоже не могут быть ни описаны, ни интерпретированы в единой системе отсчета.

Для получения результирующего выражения, рассмотрим совместное движение двух точек жидкости. Используя формулу (27) получим расстояние между точками R_i и R_0 на новый момент времени:

$${}^{k+1}r = {}^{k+1}R_1 - {}^{k+1}R_0 = r + v_1 t + f_1 \frac{t^2}{2\rho}. \quad (30)$$

Если $\overset{k+1}{r_i}$ считать пробным вектором из тройки векторов определяющих тензор формы локального базиса, то для любой точки a в этом базисе:

$$\overset{k+1}{r} = \overset{k+1}{R}_1 - \overset{k+1}{R}_0 = r + v_1 t + f_1 \frac{t^2}{2\rho} \quad (31)$$

2.3. Анализ критериев. Рассмотренный метод построения вычислительного эксперимента показан в обобщенном виде, поэтому пока не представляется возможным произвести оценки точности расчетов. Такие оценки существенно связаны с формой крупных частиц жидкости, зависят от структуры программной реализации и методов доступа к информации в расчетной области.

Контроль же критериев существования решения, его динамическая интерпретация и модификация численной модели заложены в основу разработки предлагаемого вычислительного эксперимента. Реализация такого контроля выносится на этап построения конкретной алгоритмической модели. Он может проявляться в исследовании тензора формы \hat{r} или в установлении эмпирических зависимостей между частицами жидкости. Более высокий уровень анализа состояния частиц может быть построен с помощью тензора плотности $\overset{\wedge}{\rho}$ (=тензора внутренней гидромеханики), что выразится в рассмотрении взаимодействия диполей, вихрей и источников, формализующих этот тензор.

Простейший критерий устойчивости может быть связан с абсолютной скоростью частиц жидкости:

$$\|\vec{r}_i\| \geq |V| \cdot t. \quad (32)$$

Он означает, что смещение узлов за расчетный интервал времени не может превышать размеров частицы жидкости. Полученный критерий не характеризует общий ход решения, т.е. скорость варьи-

руемая величина. В задаче о длинных волнах общий критерий может быть получен с помощью ускорения свободного падения, которое не изменяется во всей расчетной области.

Пусть тензором формы \hat{r} будет расчетная ячейка с размерами: H – глубина моря; x – шаг сетки. Тогда распределенная массовая сила:

$$\hat{f} = \rho \cdot \hat{g}$$

обладает свойствами тензора скорости \hat{V} . Учитывая условие неразрывности, определенное с помощью смешанного тензора конвективных скоростей:

$$\operatorname{tr}(\hat{v}) = \operatorname{tr}(\hat{f}) = 0$$

перенесем ускорение w_z на вертикальную грань частицы:

$$w_x = g \cdot H/x.$$

В качестве критерия устойчивости используем интервал времени, за который вертикальная грань деформирующейся ячейки приобретет критическую скорость (32)

$$V_x \cdot t = g \cdot H \cdot t^2/x < x.$$

В результате получается традиционный критерий Куранта:

$$t \leq \frac{x}{\sqrt{g \cdot H}}, \quad (33)$$

где в знаменателе стоит скорость распространения силового возмущения, в данном случае это фазовая скорость длинных волн:

$$C = \sqrt{g \cdot H}.$$

Необходимо отметить, что при получении критерия Куранта (33) было использовано условие неразрывности, выраженное через след тензора конвективных скоростей:

$$\operatorname{tr}(\hat{\psi}) = 0$$

вместо условия сохранения объема

$$\det(\hat{r}) = \text{const} \quad (34)$$

В задачах аэродинамики аналогом глубины моря H является плотность жидкости ρ которая формализует внутреннюю энергию

крупной частицы. В данной работе не исследовался тензор плотности ρ , поэтому отметим только, что скалярность величины H является основным упрощающим отличием уравнений длинных волн от полных уравнений гидродинамики в тензорном представлении.

3.1. Разностные уравнения. Проведем построение разностных уравнений для одномерной задачи о распространении длинных волн.

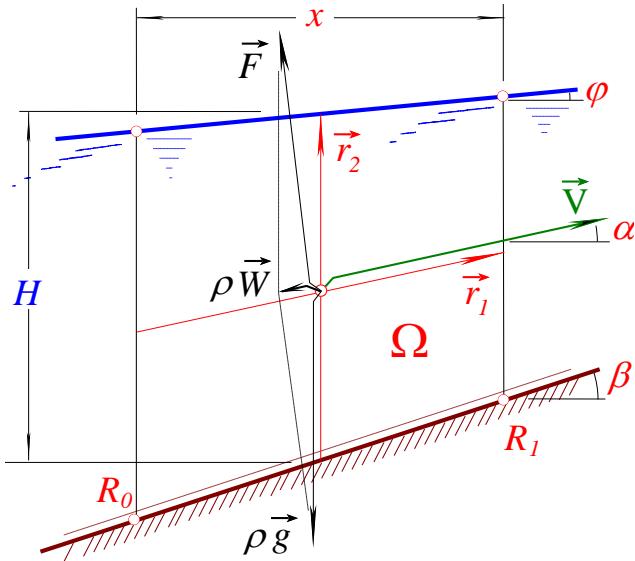


Рис. 2.9. Расчетная ячейка – частица.

Геометрия крупной частицы жидкости (рис.2.9.) определяется дуальными (*взаимно обратными*) тензорами:

$$\hat{r} = \hat{r}_{ij} = \begin{vmatrix} x & 0 \\ x \cdot \tan \alpha & H \end{vmatrix}; \quad (35)$$

$$\check{r} = \hat{r}^{-1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{x}{H} & \frac{1}{H} \end{vmatrix}. \quad (36)$$

Объем частицы \hat{r} :

$$\Omega = \det(\hat{r}) = x \cdot H. \quad (37)$$

Уравнения движения получаются после одновременного применения граничных условий на свободной поверхности и условий

непротекания на дне моря, подчеркивая их единую суть, как полноценных уравнений механики:

Внешняя массовая сила должна иметь направление по нормали к свободной поверхности;

Вертикальная составляющая внешней силы определяется ускорением свободного падения g , следовательно

$$\vec{F} = \begin{vmatrix} -\rho \cdot g \cdot \tan \varphi \\ \rho \cdot g \end{vmatrix}; \quad (38)$$

Условие непротекания моделируется компенсацией нормальной составляющей внешней силы в локальной системе отсчета

$$\begin{aligned} \overset{\leftarrow}{F} = \hat{r} \cdot \vec{F} &= \rho \cdot g \cdot \begin{vmatrix} \frac{\tan \varphi}{x} \\ \frac{\tan \varphi}{\Omega} (\tan \alpha + 1) \end{vmatrix}; \\ \overset{\leftarrow}{F} = \langle \text{отражение} \rangle &= \rho \cdot g \cdot \begin{vmatrix} \frac{\tan \varphi}{x} \\ 0 \end{vmatrix}; \\ \vec{F} = \hat{r} \cdot \overset{\leftarrow}{F} &= -\rho \cdot g \cdot \begin{vmatrix} \tan \varphi \\ \tan \varphi \tan \alpha \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (39)$$

Здесь угол α определяет заданное направление движения частицы жидкости, φ - угол склона волны:

$$\tan \varphi = -\frac{\partial \eta}{\partial x}. \quad (40)$$

Таким образом получено традиционное уравнение движения теории длинных волн на мелкой воде:

$${}^{k+1}V = {}^kV - g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \cdot t \quad \text{или} \quad \frac{\delta V}{\delta t} + g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (41)$$

При получении формулы (41) все тензорные операции были выполнены аналитически, поэтому из программы можно исключить ее функциональное наполнение. Сам же расчетный алгоритм будет соответствовать традиционным методам проведения вычислительного эксперимента.

3.2. Алгоритмы. В соответствии со структурой матрицы взаимодействия программ при проведении вычислительного эксперимента (рис.7), алгоритм решения задачи будет состоять из трех этапов, каждый из которых, в зависимости от уровня вычислительных процедур, будет определяться соответствующей строкой этой функциональной матрицы:

1 этап:

По заданным координатам узлов расчетной сетки { R } и полю уровней моря { H }, рассчитываются внешние силы для центров объема крупных частиц жидкости (=ячеек расчетной области)

$$F = -\rho \cdot g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x}. \quad (42)$$

Здесь можно проконтролировать величину угла склона волны, и если искусственно ограничить этот угол 60-ю градусами, что соответствует разрушению стоячей волны, то в решение будет внесено рассеяние энергии, соответствующее образованию бора.

Это важно, что в расчетной схеме не предусматривается сохранение поля внешних сил, то результатами первого этапа будут:

- Новое поле скоростей:

$${}^{k+1} \vec{V} = {}^k \vec{V} + \vec{F} \cdot \frac{t}{\rho}, \quad (43)$$

- Новые координаты расчетных узлов:

$${}^{k+1} \vec{R} = {}^k \vec{R} + {}^k \vec{V} \cdot t + \vec{F} \cdot \frac{t}{2\rho}, \quad (44)$$

где \vec{V} è \vec{F} относятся к координатам узлов \vec{R} .

2 этап:

На первом этапе рассматривались свободные горизонтальные перемещения частиц жидкости. Это допустимо, если уровень моря считать независимым скалярным параметром, который характерен для решения задач о сжимаемой жидкости. Тогда условие сохране-

ния объема можно выполнить путем расчета нового поля уровней моря (28):

$${}^{k+1}H = \frac{{}^kx^k H}{{}^{k+1}x}.$$

На этом этапе расчетов необходимо контролировать критерии существования решения: ${}^{k+1}x > 0$ и устойчивости (32), (33). В случае нарушения критериев можно прибегнуть к полуаналитическим аппроксимациям решения внутри крупных частиц жидкости или использовать соответствующие эмпирические соотношения.

3 этап:

Очевидно, что предлагаемое деление на расчетные этапы плохо сопоставляется с реальными процессами течения жидкости. Суть такого деления скорее соответствует цели сопоставления нового подхода с известными расчетными схемами. Например, второй этап не нужен: если в уравнение движения (44) были бы включены тензорные составляющие \hat{r} , \hat{v} и \hat{f} . Третий этап завершает моделирование решения на неподвижной Эйлеровой сетке, здесь новое поле скоростей и уровней моря интерполируется на исходные расчетные узлы: $V=V(R)$; $H=H(R)$.

Здесь же производится корректировка решения на границах расчетной области:

- Излучение волны из расчетной области:

$${}_{ep}V = \pm \eta \sqrt{gH};$$

- Генерация входящей волны:

$${}_{ep}H = f(R \pm T \sqrt{gH}).$$

3.3. Результаты моделирования. Описанный алгоритм решения был реализован на объектно-ориентированной языке программирования C++. Ключевым элементом реализации программной среды явилось достижение принципиальной возможности для быстрой перестройки всех расчетных схем, необходимых для постановки

моделирования прикладных задач, основанных на известных численных решениях для систем конечно-разностных уравнений, допускающих явные численные схемы для реализации нестационарных волновых задач (*с преимущественно гиперболическими свойствами*) [Белоцерковский, 1984; Марчук, 1983]. Несмотря на принципиальное понимание физической сути и особенностей моделируемых процессов в новых вычислительных экспериментах, обобщение математических моделей для решения прикладных задач о воздействии штормовых волн на реальные морские инженерные сооружения пристановлены на стадии разработки трехмерной графической среды, условия для создания которой возникли только в настоящее время, когда компьютеры с мощными графическими возможностями стали доступны для проведения исследовательских работ.

По приведенному выше алгоритму можно отметить, что последний интерполяционный этап обладает худшей устойчивостью и на нем трудно применять сколь-нибудь обоснованные корректировки в процессе решения. Если третий этап исключить, и строить решение на подвижных узлах, то возникает возможность упрощенного моделирования выхода волны на пологий берег, где существенно увеличиваются скорости частиц жидкости и растет угол склона волны. Интерполяция, которая выполняется на втором этапе для пересчета внешних сил с центров объема частиц на узлы неподвижной сетки, вносит в решение диссипативные эффекты и может привести к нарушению устойчивости и разрушению самого решения. Для снятия этих ограничений можно отказаться от второго этапа в том виде, как он описан в этой работе. В этом случае декларативные принципы программирования на языке приводят к загромождению программы, неоправданному повторению многих расчетных операций и полной потере связи между оформлением текста программы и описываемого физического явления. Разрешение последнего противоре-

чия возможно путем совместного и независимого использования функционального и алгоритмического методов программирования [Уинстон, 1980] на основе принципов разделения доступа ко всем объектам числовой информации и контекстно-зависимым исполнительным процедурам.

Кинематическая модель расчета волновых фронтов и лучей

Возможность точного предвычисления скорости распространения волновых процессов позволяет выполнять геометрический анализ условий распространения волновой энергии с помощью быстро рассчитываемых картин волновых лучей и фронтов, а также решать технические задачи по томографии среды, что в акустике выполняется с помощью раздельного анализа тонального сигнала, разделяя его по времени на эхо и реверберацию. Методы анализа волновых сигналов хорошо отработаны и давно используются в морской технике, эти же методы легко адаптируются для прямого моделирования длинноволновых процессов в океане его прибрежной зоне.

Кинематические модели, так же как и графическая интерпретация данных естественных наблюдений и результатов предвычисленных вычислительных экспериментов, позволяет в кратчайшие сроки провести экспресс-анализ обстановки на море, сразу же после поступления данных о проявлении опасных морских явлений. Такой экспресс-анализ может быть выполнен многократно, по мере изменения или поступления новых исходных данных.

Кинематическая модель распространения волновых фронтов и лучей основывается на сортировке точек с минимальными отсчетами времен добегания длинных волн, полученных на основе принципа Гюйгенса для точечных излучателей. В настоящее время реализована модель, использующая 4-точечный шаблон, на котором вычисляются производные по направлению.

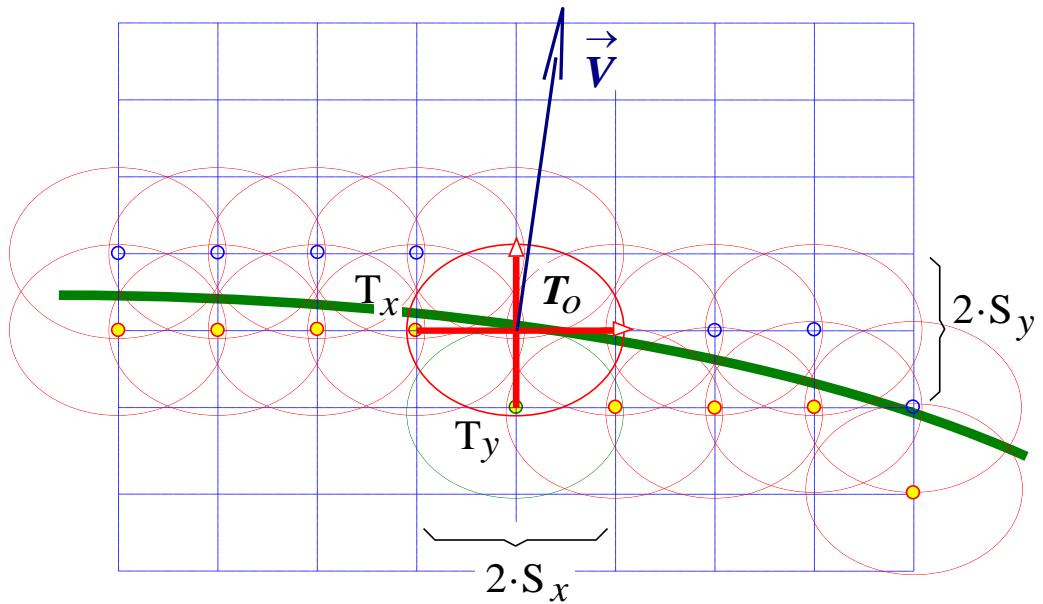


Рис. 2.10. Каждый такт вычислений нацелен на поиск точек, наиболее близких к текущему времени на фронте волны T_0 . В найденной точке время уточняется с помощью расчета направления движения фронта волны, и принимается за новое текущее расчетное время, при необходимости добавляются новые предфронтовые точки или уточняется время в уже имеющихся, затем поиск повторяется для выбора новой узловой точки на сеточной области, охваченной текущим фронтом волны.

Поле времен получается достаточно гладким, чтобы по нему восстанавливались не только линии изохрон, но и линии лучей, которые показывают маршруты движения длинных прогрессивных волн. Указанную вычислительную модель можно отнести к гидродинамическому моделированию нулевого порядка, по которому возможно построение поля коэффициентов усиления на фронтах первого вступления длинных волн, когда коэффициент усиления вычисляется из условия сходимости лучевых линий и не зависит от периода волнения.

Основная часть алгоритма основывается на поиске фронтовой точки (среди точек включенных в специальный список, рис. 18), у которой текущее время (пробега) является минимальным. Найденная точка используется в качестве излучателя, вовлекая в список фронтовых точек ближайшие смежные точки, сама же излучающая точка при этом исключается из фронтового списка.

В процедуре Time, программы ANI, реализован новый фронтовой шаблон - типа “крест”, на котором кроме вычисления минимальных времен производится уточнение времени в центре шаблона с помощью оценки направления излучения по всем четырем лучам шаблона.

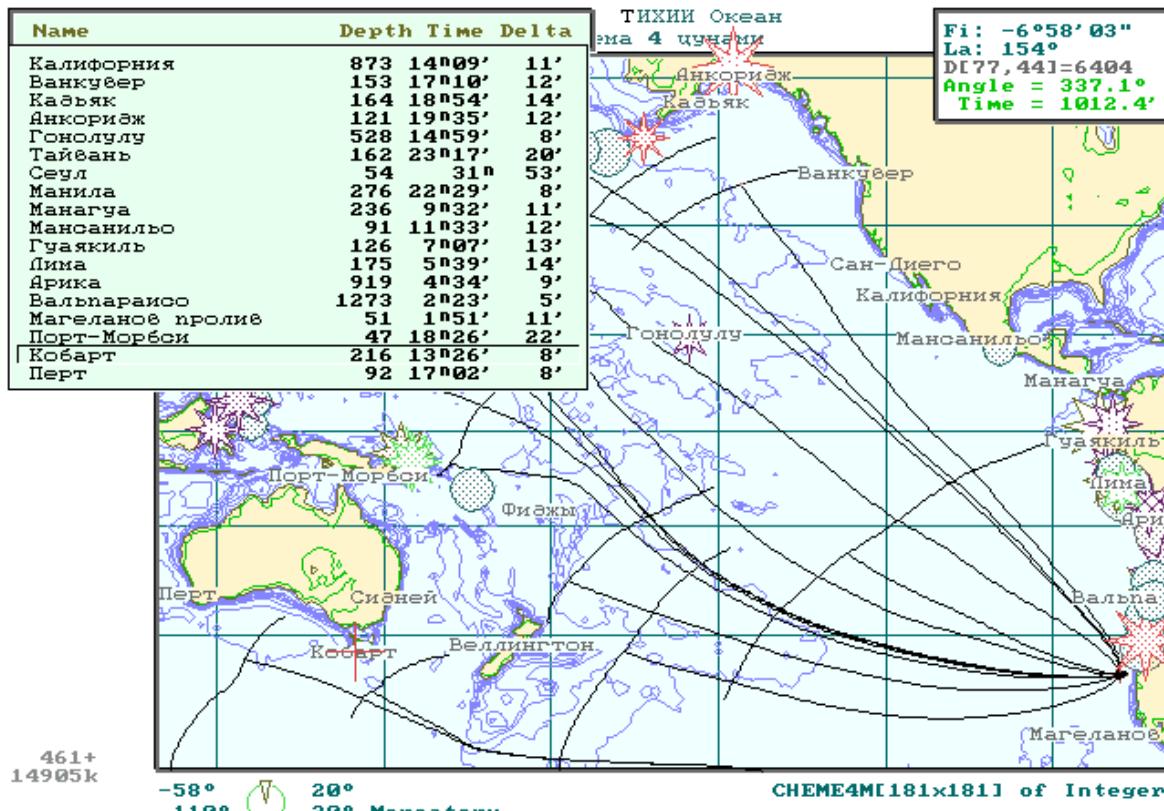


Рис. 2.11. Изображение на экране ЭВМ при выполнении кинематических расчетов с использованием географических, батиметрических и сейсмических информационных комплексов. Кинематическая модель позволяет получать точные решения или визуально оценивать прямые и обратные кинематические задачи о трансокеанском и прибрежном распространении фронтов и лучей длинных волн. В табличке слева вверху приведены данные о времени подхода фронта волны к конкретному мореографическому пункту, а также оценка точности выполненного измерения времени.

Точный учет сферичности Земли на карте в Меркаторской проекции, может быть осуществлен с помощью соответствующей корректировки исходного поля скоростей распространения длиных волн:

$${}_{ij}^0 C = {}_{ij} C \cdot \cos {}_{ij} \varphi,$$

искусственно уменьшающей эту скорость пропорционально изменению масштаба карты.

Для уточнения времени в центре шаблона используется следующее неявное уравнение:

$$\sqrt{\left(\frac{S_X}{T_0 - T_X}\right)^2 + \left(\frac{S_Y}{T_0 - T_Y}\right)^2} = C = \sqrt{g \cdot H}.$$

В текущей версии программы ANI поправка ко времени в центре шаблона аппроксимируется следующим приближенным выражением:

$$\Delta T_0 = \frac{\sqrt{\delta T_X^2 + \delta T_Y^2}}{1,36} \cdot \left(\frac{\max(\delta T_X / S_X, \delta T_Y / S_Y)}{\sqrt{(\delta T_X / S_X)^2 + (\delta T_Y / S_Y)^2} - 1,01} \right),$$

где: S_X, S_Y - шаг расчетной сетки; T_0, T_X, T_Y - расчетное время прихода фронта волны в центре и на концах крестового шаблона; ΔT_0 - поправка времени прихода волны в центральную точку шаблона; $\delta T_X = T_X - T_0$, $\delta T_Y = T_Y - T_0$ - разности времен прихода волн между центральной и концевыми точками шаблона; C – скорость распространения волны в центре шаблона; H – глубина моря.

С целью ускоренной прорисовки волновых лучей и фронтов, которая выполняется в темпе движения курсора по графическому экрану ЭВМ, а также для повышения точности интегрирования, в оперативной памяти выделяется дополнительная матрица для сохранения косинусов углов подхода фронта волны к расчетной ячейке.

Указанную вычислительную модель можно отнести к гидродинамическому моделированию нулевого порядка, которое допускает построение поля коэффициентов усиления волны цунами на основе предположения о сверхдлинных волнах, в котором коэффициент усиления вычисляется из условия сходимости лучевых линий (кривизны фронта) и не зависит от периода волны.

$$\zeta = \frac{\sum_{d=\delta N, \delta S, \delta W, \delta E} d \cdot \zeta_d}{\sqrt{(N-S)^2 + (W-E)^2}},$$

где: N, W, S, E - отсчеты времени в точках шаблона, отмеченных сторонами света; $\delta N, \delta W, \delta S, \delta E$ - разности времен между концевыми точками шаблона и его центром; ζ_d - величина уровня моря в точках шаблона, отмеченных направлением d .

Реализованная в программе возможность быстрого построения и прорисовки волновых лучей может быть использована для визуального определения участков побережья, на которых происходит концентрация волновой энергии, связанная с фокусировкой фронта для первого вступления волны цунами.

Достоинством кинематического (или нулевого) приближения при проведении вычислительного эксперимента является высокая скорость при проведении расчетов времен пробега волн и выявления участков побережья с наибольшим усилением амплитуды первого вступления волны цунами (рис.2.13).

Если рядом с береговым пунктом имеется обширная шельфовая зона, то развитие волнового процесса вблизи берегов будет подчиняться геометрическим свойствам этого шельфа, всегда содержащем аккорд из нескольких “собственных” волн.

Более реальную волновую картину можно получить путем постановки полного прямого вычислительного эксперимента, в основе которого лежат длинноволновые уравнения динамики океана.

Вычислительная модель гидродинамического режима на основе уравнений длинных волн в полных потоках

Прямые вычислительные эксперименты предназначены для непосредственного и полного моделирования гидродинамических процессов. Соответственно, по мере поступления уточненных данных с постов наблюдения, моделируемые процессы должны адапти-

роваться к уточненным исходным данным о текущем состоянии морских акваторий.

Все уравнения определены на Меркаторской картографической проекции и скорректированы поправками на вращение Земли и придонное трение жидкости.

$$\begin{array}{l} \text{Уравнения} \\ \text{движения:} \end{array} \quad \tilde{U}_x = g \cdot D \cdot \frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial x} \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \cdot dt, \quad \tilde{U}_y = g \cdot D \cdot \frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial y} \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \cdot dt$$

$$\text{Уравнение неразрывности: } \tilde{\zeta} = \left(-\frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) \cdot \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \cdot dt$$

$$\text{Поправки} \quad \tilde{U}_x = 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot \tilde{U}_y \cdot dt = 1.4544 \cdot 10^{-4} \cdot \sin \varphi \cdot \tilde{U}_y \cdot dt,$$

$$\text{Кориолиса:} \quad \tilde{U}_y = 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot \tilde{U}_x \cdot dt = 1.4544 \cdot 10^{-4} \cdot \sin \varphi \cdot \tilde{U}_x \cdot dt.$$

$$\text{Поправки на} \quad U_x = \tilde{U}_x \cdot \frac{K_v \cdot |\vec{U}|}{D^3} \cdot dt; \quad U_y = \tilde{U}_y \cdot \frac{K_v \cdot |\vec{U}|}{D^3} \cdot dt, \\ \text{донное трение:}$$

где: выражение: $F \pm f(x) \cdot \delta x$ - соответствует синтаксису языка программирования C++, и использовано здесь для выражения порядка разделения уравнений по физическим параметрам. Его необходимо понимать как: $F = F \pm f(x) \cdot \delta x$;

D [м] - глубина спокойного моря;

ζ [м] - отклонение уровня моря от равновесного состояния;

φ, φ_0 - широта в расчетной точке и приведенная широта Меркаторской карты;

$\vec{U} [m^2/c] = \vec{V} \cdot D$ - вектор полного потока жидкости;

$\vec{V} [m/c] = \frac{1}{D+z} \cdot \int_{-D}^z \vec{V} dz$ - осредненная по глубине скорость жидкости.

Если уравнения используются в приведенных операциях интегрирования без дополнительных алгебраических преобразований, то суть этих операций необходимо связывать с описанием существенно нелинейных процессов [Белоцерковский, Давыдов, 1982]. Последнее особенно справедливо в отношении Курило-Камчатского региона,

где рельеф океанского дна очень сильно изрезан, с большими поверхностными градиентами в глубоководном желобе, и обширными зонами мелководного шельфа в районе Северных и Южных Курил.

Сделаем предположение, что вышеупомянутые нелинейные факторы в реализованных вычислительных моделях все-таки отвечают физике естественных процессов в океане, и скорее уточняют результаты моделирования, нежели вносят недопустимо большие погрешности в процессы вычислений [Храмушин, 1988].

Условия и критерии моделирования.

Границные условия вблизи побережья специально не ставятся, так они выполняются по естественному правилу: $C = \sqrt{g \cdot D}$, где скорость волны обращается в ноль по достижении нулевой глубины на побережье. Это естественное условие, которое соответствует реальным физическим процессам в океане, где отражение волновой энергии происходит не от побережья, а в полной мере обусловлено геометрией океанского дна, свалами глубин и зонами захвата волновой энергии, которые на мелководных участках шельфа обладают высокой добротностью.

На глубоководных “свободных” границах расчетной области задаются условия излучения, которые экстраполируют форму волнового поля на одну ячейку за пределы расчетной области. В аналогичных уравнениях аэrodинамики такая экстраполяция выполняется с помощью пространственного дифференцирования более высокого порядка, что соответствует вычислению скорости распространения возмущений. В океанологии такое дифференцирование не приводит к устойчивому результату. Однако решение заметно упрощается, если учесть, что скорость длинных волн находится в прямой зависимости от глубины моря. Если же предположить, что амплитуда волны цунами мала по сравнению с глубиной моря, что для “свобод-

ных” границ в задаче о цунами вполне справедливо, то скорость распространения возмущений на этих границах может быть успешно заменена обычным соотношением для скорости распространения длинных волн на мелкой воде: $C = \sqrt{g \cdot D}$.

Границные условия на свободных границах расчетной области задаются с помощью условия излучения Зоммерфельда, которое особым образом учитывается в ячейках вблизи границ расчетной области. Обычно здесь рассматривается малое внешнее возмущение, задаваемое с помощью дифференциала (*приращения*) во времени:

$$\frac{\delta \zeta}{\delta t} = \frac{\delta \zeta(t)}{\delta t} \pm \vec{C} \cdot \left(\frac{\delta \zeta}{\delta \vec{r}} + \frac{\delta \zeta(t)}{\delta \vec{r}} \right),$$

где: $C = \sqrt{g \cdot D}$ – скорость волны; $\delta r = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}$ – контрольный размер ячейки; $\frac{\delta \zeta}{\delta \vec{r}} = \overline{\text{grad}}(\zeta)$ – градиент наклона поверхности моря.

Однако в реальной практике аналогичное условие необходимо применять также и к уравнению движения, определяющему приращение полного потока жидкости через свободную границу.

Приведенные уравнения аппроксимируются явной схемой первого порядка на центрированном разностном шаблоне. Устойчивость расчетной схемы во времени определяется критерием Куранта, который определяется через минимальное расчетное время, за которое свободная волна пересекает противоположные границы одной расчетной ячейки:

$$\Delta T \leq \frac{\delta y \cdot \delta x}{(\delta \vec{r} \cdot \vec{C})_{\max}} \cdot 0.8,$$

здесь: δy , δx - пространственный размер расчетных ячеек.

При вычислении ΔT производится анализ всей расчетной области и выбирается минимальная величина ΔT , которая зависит как от изменяющихся размеров ячеек δy , δx , так и от глубины моря.

Пространственная картина волнообразования может быть охарактеризована аппроксимационной гладкостью, качество которой определяется количеством опорных точек, участвующих в построении пространственного полупериода волны. Для гиперболической системы уравнений, описывающей динамику океанских волн, аппроксимационный критерий может быть связан с минимальной глубиной моря, на которой моделируемая длинная волна аппроксимируется минимально-допустимым количеством узлов K :

$$D_{min} \geq \left(\frac{K \cdot \delta r}{T_{min}} \right)^2 / g.$$

D_{min} - минимальная глубина моря, при условии отсутствия которой в расчетной области, моделирование в целом можно считать справедливым; T_{min} - минимальный период длинных волн, который может проявится после задания начальных условий, либо искусственно сгенерирован в процессе вычислений; K - минимальное допустимое количество точек, аппроксимирующих волну с периодом T_{min} на участке моря с глубиной D_{min} .

Обычно этот минимум достигается в шельфовой зоне или непосредственно вблизи побережья. Так как при моделировании нас интересуют именно прибрежные акватории, то последний критерий является также условием выбора минимальной глубины моря, на которой еще допускается моделирование движущихся со стороны океана длинных волн. Из практики вычислений известно, что при моделировании первых одного - двух периодов волны цунами - K может быть принято в пределах: $4 \div 6$, для длительного же моделирования волнообразования в шельфовой зоне или при восстановлении приливного режима, этот критерий должен быть увеличен до: $K \geq 24$.

В обобщенном виде уравнения движения представляются в следующей форме:

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} = -g \cdot D \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} + 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot U_y - \frac{D}{\rho} \cdot \frac{\partial P_A}{\partial x},$$

$$\frac{\partial U_y}{\partial t} = -g \cdot D \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} - 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi \cdot U_x - \frac{D}{\rho} \cdot \frac{\partial P_A}{\partial y}.$$

Уравнение неразрывности: $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_x}{\partial x} \right)$, где: D [м] - глубина спокойного моря; ζ [м] - отклонение уровня моря от равновесного состояния; φ , φ_0 - широта в расчетной точке и приведенная широта Меркаторской карты; \bar{U} [m^2/c] = $\vec{V} \cdot D$ - вектор полного потока жидкости; \bar{V} [м/с] = $\frac{1}{D+z} \int_{-D}^{\zeta} \vec{V} dz$ - осредненная по глубине скорость течения. P_A [мбар· 10^2] – приводное давление атмосферы

Методы обеспечения качества численного моделирования длинноволновых процессов

При проектировании вычислительного эксперимента, особое внимание должно уделяться безусловному удовлетворению пространственных аппроксимационных критериев, обеспечивающих плавное, с малыми приращениями описание геометрической формы моделируемой волны. Так, при подходе к мелководному шельфу, волна цунами становится очень короткой, и может стать меньше чем шаг расчетной сетки. Если же длина моделируемой волны становится равной двум шагам сетки, что соответствует частоте Найквиста, то соответствующая ячейка становится источником вынужденных шумовых колебаний, нередко проявляющихся не только в ее окрестности, но и на всем пространстве моделируемой морской акватории. Активизация возмущений от таких точек может полностью исказить характер отражения длинных волн от побережья.

Внешне, механизм разрушения решения выглядит следующим образом. На трехмерной картине волнообразования «осциллирующая» точка выглядит как малоподвижный пик стоячей волны с высокой амплитудой. Образуются такие пики в районах мелководья. При этом в смежных точках, в которых глубина существенно боль-

ше, начинают возбуждаться высокочастотные колебания со столь же огромной амплитудой. В математическом плане это означает, что производится дифференцирование далеко не малых величин, что не соответствует постановке задачи об аппроксимации гладких функций с помощью конечных разностей.

Если же аппроксимационные критерии нарушаются в нескольких смежных точках, то в этом районе можно наблюдать высокоамплитудные неугасающие пространственные осцилляции, где во всех смежных точках амплитуда волн имеет различные знаки, что свидетельствует о явном нарушении аппроксимационных критериев и полном разрушении численного решения.

Для решения указанной проблемы задействован целый комплекс средств, и первый из них - это постоянное наблюдение за ходом моделируемого длинноволнового процесса вблизи побережья, для чего весь процесс решения визуализируется в виде мультфильма на графическом терминале ЭВМ. Во вторых, предусмотрен механизм отсечения мелководья, превращением его в береговую зону, это по крайней мере не позволит возникнуть осциллирующим точкам, с не-предсказуемой частотой генерируемых волн. И коренное решение проблемы происходит, если при подходе волны цунами к заданному участку побережья, произвести смену батиметрии на более подробную и охватывающую меньший регион, после чего все физические поля переинтерполируются и переносятся на более подробную расчетную сетку, с улучшенными аппроксимационными свойствами.

Чтобы осуществить практическую реализацию разработанной методики, в программном комплексе предусмотрена возможность контроля периода волны во времени в соответствии с количеством аппроксимирующих эту волну точек в пространстве. Предусмотрено несколько методов визуализации волнового поля, которые могут быть осуществлены в виде квази-трехмерного поля, поля изолиний

уровня, или цветных штриховых закрасок и комбинации из этих изображений. На эти поля также могут быть наложены стрелки векторного поля потоков или скоростей течения. Моделирование распространения волн может быть остановлено по команде с клавиатуры, и затем произведена перестройка расчетной области или физических характеристик численной модели, при необходимости добавлено новое внешнее возмущение, и затем продолжен расчет.

Уже реализованный комплекс вычислительных процедур предназначен, в первую очередь, для совершенствования инструментальных средств океанолога - исследователя и оформлен в виде графической экспертно-информационной среды, которая в будущем могла бы унифицировать обработку океанологической, метеорологической и сейсмической информации в проблеме цунами, морских наводнений и других опасных морских явлениях.

2.4. «Гидродинамическая модель очага цунами»

Заявка на изобретение: № 2016150038 от 2016-12-19, вх.№ 080336 (составлено 2016-11-16).

Гидродинамическая модель очага цунами для оперативного прогноза опасности морских наводнений и экстремальных течений вблизи защищаемых участков побережья с использованием прямого вычислительного эксперимента основана на макросейсмический аппроксимациях параметров подводного землетрясения, и отличается реализацией гидродинамического отклика на кратковременные и интенсивные сейсмические сотрясения морского дна, приводящие к оползневым явлениям и дисперсионным эффектам трансформации длинных волн в акваториях с высокодобротными осцилляторами собственных колебаний уровня моря, что строго определяется геометрическими построениями и установкой начальных параметров движения волн цунами:

– главные оси эллиптической деформации поверхности моря ориентируются по направлениям преобладающих изобат и берегового уреза;

– в зависимости от крутизны наклона морского дна, в мористой зоне сейсмического очага устраивается фронт волны цунами с подъемом уровня моря по макросейсмическим оценкам, переходящим в отрицательную полуфазу волны с опусканием уровня ближе к побережью до 25-30% от величины фронта на глубокой воде;

– на наклонном дне положительной и отрицательной полуфазам волн цунами придается начальный импульс движения в направлении меньших глубин, для чего очаг инициируется векторным полем до 30-40% от полного потока прогрессивной волны;

– на ровном дне подъем уровня стационарный, начальной скорости движения фронта не определяется.

Формальные подходы к построению очага цунами

Вычислительная и математическая модель относится к вычислительной гидромеханике, гидрометеорологии и наукам об Атмосфере, Океане и Земле в плане реализации комплексного численного моделирования их взаимодействия при проявлении морских наводнений, экстремальных течений и других опасных морских явлений в открытом океане и вблизи побережья,

Интерактивной алгоритмической моделью определяются начальные условия для постановки и управляемой реализации прямого вычислительного эксперимента по моделированию зарождения, распространения и воздействия на морское побережье волн цунами сейсмического и гидрометеорологического происхождения. В программном комплексе реализуются возможности строгого и однозначного определения начальной геометрической формы и гидродинамических параметров очага цунами, возникающего в акваториях

вблизи морского побережья, на шельфе и океанском склоне в момент сильного подводного землетрясения с магнитудой 7,0 и более.

Физика процессов зарождения цунами определяется эмпирическими зависимостями с использованием стандартных макросейсмических оценок [81] магнитуды и подземной глубины сейсмического очага, по которым переопределяется геометрическая форма, ориентация и параметры гидродинамической подвижности исходной волны цунами в зависимости от геометрических характеристик рельефа морского дна в зоне землетрясения.

В обосновании корректности гидродинамического очага цунами и вычислительной модели его трансформации, использованы результаты серии поверочных расчетов реальных цунами, в том числе охватывающих особо контролируемые бухты и гавани морских портов. Соответственно, опыт практического использования вычислительных экспериментов с сопоставлением результатов с реальными наблюдениями цунами на морском побережье, может служить обоснованием реальной возможности заблаговременного получения адекватных оценок опасности цунами в конкретных морских акваториях по результатам прямых вычислительных экспериментов с использованием многопроцессорной вычислительной техники.

Уровень техники в реализации и использовании вычислительной модели

Морские оперативные службы, так же как и режимные отделы инженерных изысканий в области контроля и прогноза динамики взаимодействия атмосферы и океана, в настоящее время активно действуют прямые вычислительные эксперименты с использованием высокоэффективных компьютеров и систем дистанционных измерений реального гидродинамического состояния морских акваторий и атмосферы.

Возможность оперативной оценки параметров очага цунами обосновывается по результатам систематических ретроспективных вычислительных экспериментов по моделированию различных исторических цунами сейсмического и синоптического происхождения. В основу построения вычислительных моделей положено макросейсмическое обоснование возможности возникновения длинноволновых откликов на кратковременные сейсмические толчки по материалам анализа множества сейсмических событий и наблюдений реальных цунами. Механизмами зарождения цунами, в том числе, рассматриваются оползневые проявления на наклонном морском дне, усиливающиеся за счет аккумулирования большей гидродинамической энергии при сотрясениях глубоководных участков морского дна, откуда, в результате длинноволновой дисперсии направляется гидродинамический поток в сторону меньших давлений морской воды – на мелководье.

Следовательно, практическое использование настоящих гидродинамических и вычислительных моделей позволяет оперативно вырабатывать вполне адекватные оценки проявления цунами вблизи побережья, которые, в том числе, могут непрерывно уточняться при поступлении обновленной информации о реальном проявлении опасных морских явлений непосредственно в процессе оперативного контроля и прогноза усиления или снижения опасности воздействия волн цунами на конкретных участках морского побережья, в бухтах и гаванях морских портов.

Регламент использования макросейсмического очага цунами

В условиях действующих морских служб оперативного прогноза и предупреждения об опасных природных явлениях: о морских наводнениях при возникновении подводных землетрясений; также как и в случае штормовых нагонов при прохождении тайфунов, име-

ется лишь ограниченная информация о происходящем событии на море, необходимая для формирования начальных граничных условий с целью построения и выполнения вычислительных экспериментов для оценки потенциальной опасности морских наводнений и экстремальных течений на морском шельфе и прибрежном мелководье, на береговом урезе и в гаванях морских портов.

Построение очага начинается с получения информации от сейсмологической службы о магнитуде и географических координатах произошедшего землетрясения, а в случае малой удаленности от побережья, может быть полезной оценка глубины сейсмического очага землетрясения. По этим данным вычисляются геометрические размеры и делается оценка изменения уровня моря в очаге цунами, для чего используются регрессионные аппроксимации многочисленных событий цунами в заданном регионе по макросейсмической гипотезе сотрясаемости морского дна [81, Поплавский и др., 1998]. Собственно для каждого района океана такие оценки геометрических параметров очага цунами могут различаться, однако в интересах оперативной службы вполне достаточно расчетов с использованием осредненных значений. Гидродинамические особенности в построении очага цунами имеют существенно большее влияние на ожидаемые результаты прямых вычислительных экспериментов.

На участках морского дна с относительно одинаковой глубиной можно ограничиться использованием исходных геометрических построений для макросейсмического очага цунами, без дополнительных искажений его простейшей эллиптической формы и без указания начальной скорости движения фронта волны. Это так называемый «поршневой механизм» условного подъема морского дна, в котором большая ось эллиптического макросейсмического очага ориентируется вдоль геологических разломов в земной коре, если местоположение таковых известно, либо выравнивается равноудалено

от берегового уреза – по нормали к направлению на береговой пункт, что предопределяет наиболее опасный вариант проявления цунами у контролируемого участка побережья. Стационарный очаг распадается на два расходящихся фронта волны цунами с высотой вдвое меньшей исходного стационарного подъема уровня моря.

В случае землетрясения на наклонном фрагменте морского дна, большая ось макросейсмического очага цунами ориентируется по направлению преобладающих изобат, вдоль относительно равных глубин или равноудалено от берегового уреза. В мелководном направлении, впереди ведущего фронта волны цунами устраивается относительно небольшое снижение уровня воды, не более половины исходной макросейсмической высоты. По величине этого отлива акватория формирования волны цунами инициируется векторами потоков для придания импульса изначального движения всех новообразованных волн с больших глубин в сторону прибрежного мелководья. Необходимая деформация геометрической формы очага цунами и перераспределения высот уровня моря и начальных скоростных потоков выполняются по аналогичным эллиптическим распределениям высот уровня моря и скоростных потоков воды, в результате наложения которых форма макросейсмического очага искажается и обретает заметное смещение фронта исходной волны цунами на удаление в сторону больших глубин.

Природа механизма формирования очага цунами при кратковременном сейсмическом событии определяется двумя факторами. При высокой сотрясаемости в несжимаемой водной толще вблизи морского дна образуются интенсивные пульсации, в том числе достигающие отрицательных давлений в фазе инерционного отрыва воды от грунта. Такой эффект проявляется сильнее на мелководьях, где давление воды в спокойном состоянии значительно меньше. Вязкий морской грунт разжижается и обретает способность переме-

щения на большие глубины – образуя подводные оползни. Гидродинамически это приводит к подъему уровня моря на больших глубинах, с соответствующим опусканием на мелководье, что в соответствии с условиями неразрывности придает начальный импульс движения в сторону берега как для положительной фазы волны, так и для ее отливной составляющей на мелководье.

Аналогичный эффект формирования фронта волны цунами с начальным импульсом движения в сторону берега может объясняться дисперсионными эффектами трансформации высокочастотной сотрясаемости водной толщи в длинные волны. На больших глубинах толща воды обретает значительно большую кинетическую энергию от сотрясаемости морского дна, которая может высвобождаться в сторону меньших гидростатических давлений на малых глубинах. Формально не существует однозначных механизмов преобразования высокочастотных колебаний морского дна в длинные волны цунами, энергия землетрясения должна поглощаться вязким сопротивлением воды на столь быстрые сейсмические колебания. Однако, вблизи мелководного побережья всегда существуют добротные длинноволновые осцилляторы с периодами порядка 3 мин., и на океанском шельфе – порядка 12 мин, и именно на этих участках морского дна очаг землетрясения получит зоны генерации интенсивных волн цунами, которые будут также ориентированы в движении в сторону берега, и проявятся на характерных для данного побережья собственных (сейшевых) периодах колебаниях уровня.

Построенный таким образом очаг цунами не привносит в результаты численного моделирования непредсказуемых неопределенностей, связанных со сложным рельефом дна или самовозбуждением сеточных аппроксимаций при нарушении интерполяционной гладкости волновых фронтов. Опыт инженерных построений аналогичных очагов цунами от исторических подводных землетрясений подтверж-

ждает в целом корректность моделируемых процессов зарождения, трансформации при распространении и последующего проявления морских наводнений и экстремальных течений на шельфе и прибрежных мелководьях, в закрытых прибрежных бухтах и гаванях морских портов.

Представленная гидродинамическая модель сейсмического очага цунами может быть задействована в качестве начальных условий для постановки и проведения прямого численного моделирования [144] волн цунами, морских наводнений и экстремальных течений вблизи побережья в оперативном режиме и в регламентной работе морских служб прогноза и предупреждения о потенциально опасных морских явлениях.

Практическая реализация изобретения ожидается в составе программного комплекса «Ani» [144], с последующим оформлением интерактивной программы для автоматического формирования очага цунами по настоящему изобретению.

Форма сейсмического очага и результаты моделирования цунами

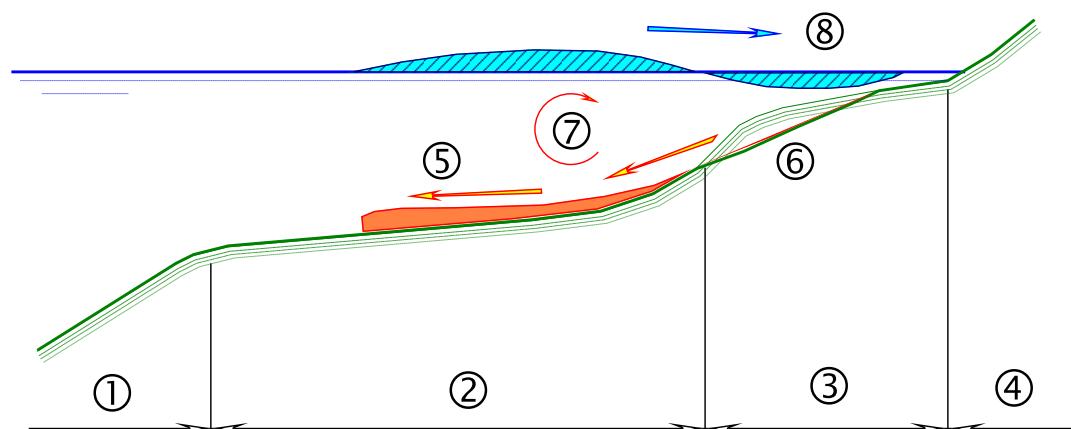


Рис. 2.12. Гидродинамический очаг цунами над донным оползнем. 1 – океанический склон; 2 – континентальный шельф; 3 – зона эстуария; 4 – береговой урез; 5 – формирование оползня на приглубом дне; 6 – смыв разжиженного грунта с мелководного склона; 7 – образование встречных потоков воды по условию неразрывности (сохранения объема жидкости); 8 – волна цунами движется в сторону берега.

Форма макросейсмического очага цунами остается без искажений в случае землетрясения на плоском горизонтальном участке морского дна (поршневой механизм). В этом случае Большая ось эллиптической очага ориентируется по геологическим разломам, либо равноудалено от берегового уреза для создания наиболее опасного варианта проявления цунами.

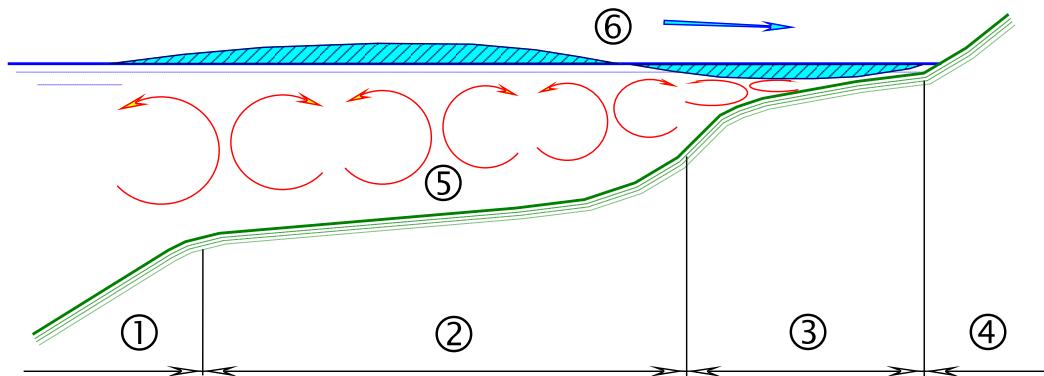


Рис. 2.13. Гидродинамический очаг дисперсионной трансформации волн на глубокой воде в длинноволновой скоростной поток в сторону мелководного берега. 1 – океанский склон; 2 – континентальный шельф; 3 – эстуарий; 4 – береговой урез; 5 – зона сейсмической сотрясаемости с образованием высокочастотных волн на глубокой воде; 6 – дисперсионное выполаживание длинных волн с направление фронта в сторону берега.

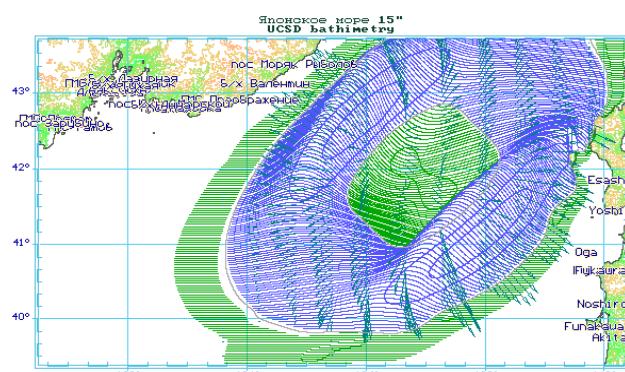


Рис. 2.14. Гидродинамический очаг цунами от землетрясения с магнитудой 8,5, на относительно ровном дне в средней части Японского моря через 10 мин. распадается на два расходящихся волновых фронта

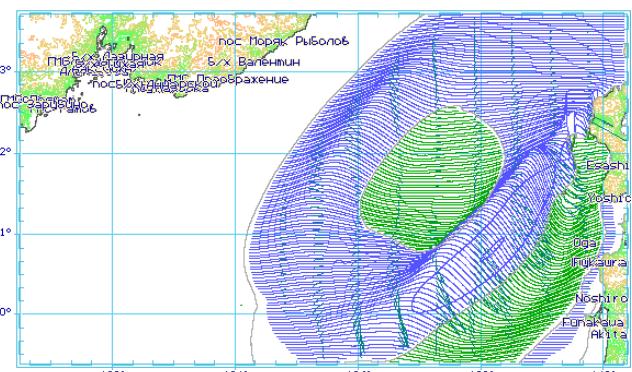


Рис. 2.15. Очаг цунами на наклонном побережье вблизи Японии через десять минут после землетрясения с магнитудой 8,5. Основная энергия фронта волны направляется в сторону ближайшего Японского берега

На наклонном участке морского дна очаг цунами ориентируется для движения фронтом в сторону ближайшего берега, куда он направляется с отливной полуфазы, за которой следует отчасти

сниженных фронт прогрессивной волны из исходного макросейсмического очага цунами, создавая, таким образом, наивысшую опасность цунами у ближайшего к очагу землетрясения морского побережья.

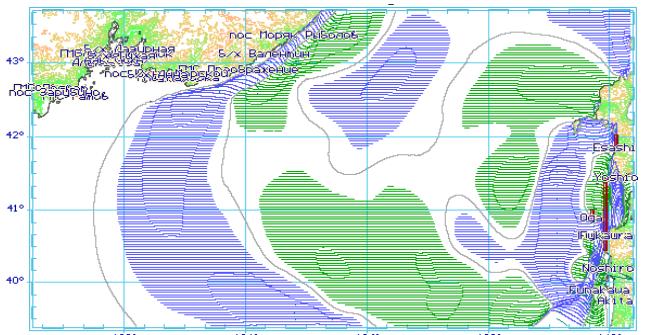


Рис. 2.16. Через 30 мин у берегов Японии проявляются подъемы уровня моря выше 7 м (максимум 20 м.), основная энергия волны с высотой порядка 4 м отражается в сторону Приморья, где будут возбуждаться длинные волны с периодом 25 мин.

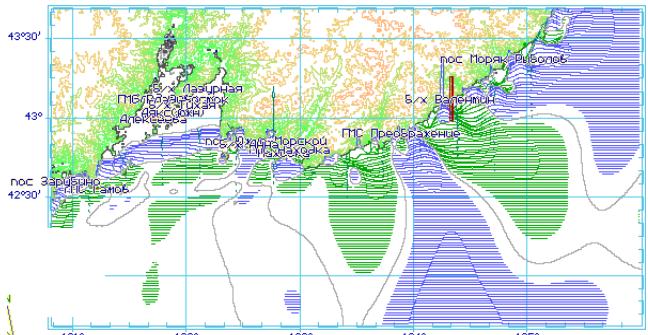


Рис. 2.17. Через час залив Петра Великого, Уссурийский и Амурский лиманы в Приморье подвергаются воздействию как инициирующих фронтов цунами от очага землетрясения, так и более крупных волн, отраженных от берегов Японии.

2.5. «Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна»

Заявка на изобретение: № 2016150042 от 2016-12-19, вх.№ 080340 (составлено 2016-11-18).

Гидродинамическая модель источника штормовых нагонов и экстремальных течений под воздействием подвижного атмосферного тайфуна предназначена для использования в морских службах с целью оперативного и своевременного прогноза опасных морских явлений вблизи защищаемых участков морского побережья по результатам прямого вычислительного эксперимента с возможностью выбора наиболее вероятных или потенциально опасных маршрутов атмосферных тайфунов и глубоких циклонов над морем, отличающаяся тем, что:

- возмущение уровня моря задается в дифференциальных приращениях атмосферного давления в форме гауссова источника – колокола внутри окружности на равноугольной меркаторской карте;
- подвижный очаг атмосферного давления дополняется ветровыми напряжениями со спиральным затягиванием поверхностных вод к центру циклонического вихря;
- для исключения ударных нагрузок на водную поверхность, все геометрические элементы формы и траектории атмосферного вихря, так же как и все его аэрогидродинамические характеристики, плавно распределяются с помощью гладких сплайновых аппроксимаций между контрольными географическими пунктами на произвольно выбираемом маршруте атмосферного тайфуна или глубокого циклона.
- применяемые методы сплайн-интерполяции геометрических и гидрометеорологических параметров построены на индексах контрольных точек во времени, что формально допускает возможность временной остановки движения циклона, в том числе с последующим возвратом его на пройденную траекторию, при этом ударные нагрузки на поверхности моря также не проявляются.

Физика и геометрия подвижного очага длинных волн

Формализация подвижного очага метеорологического цунами выполняется в рамках наук об атмосфере и океане, создающих основу для реализации комплексного численного моделирования гидромеханики их взаимодействия при проявлении морских наводнений, экстремальных течений и других опасных морских явлений в открытом океане и вблизи побережья.

Вычислительной и алгоритмической моделью штормовых нагонов представляется вариант построения начальной геометрической формы, маршрута движения и плавно изменяющихся гидроди-

намических параметров очага длинноволновых возмущений уровня моря и экстремальных течений, возникающих в акваториях вблизи побережья, на мелководных банках и океанском шельфе во время прохождения атмосферных тайфунов и глубоких циклонов. Маршрут моделируемого тайфуна или циклона выбирается с синоптических карт, в том числе с прогнозных; с определением геометрических размеров очага по замкнутым изобарам; и с возможностью указания максимальной ожидаемой скорости ветра.

Интерактивное графическое представление атмосферного тайфуна или глубоко циклона над поверхностью моря, служит заданию внешних возмущений при реализации упреждающих вычислительных экспериментов по моделированию гидродинамического взаимодействия атмосферных тайфунов и глубоких циклонов с акваториями открытого океана и прибрежными мелководьями, что востребуется для выработки достоверных прогнозов по времени фактического проявления и интенсивности опасного гидродинамического действия морских наводнений и экстремальных течений вблизи морского побережья, включая бухты и гавани портов.

Таким образом определяется строгое и однозначное определение маршрута движения, исходной геометрической формы и гидродинамических параметров очага возмущения водной поверхности при прохождении тайфунов и глубоких циклонов, минимально необходимых для выработки достоверных прогнозов морских наводнений и экстремальных течений вблизи морского побережья, включая бухты и гавани портов.

Методы практического использования вычислительного эксперимента по моделированию атмосферных воздействий

Морские оперативные службы, так же как и режимные отделы для инженерных изысканий в области контроля и прогноза динами-

ки взаимодействия атмосферы и океана [81] активно задействуют прямые вычислительные эксперименты с использованием высокоеффективных компьютеров и систем дистанционных измерений гидродинамического состояния морских акваторий и атмосферы.

Настоящее изобретение является результатом систематических ретроспективных и специальных поверочных вычислительных экспериментов по моделированию и сопоставлению с наблюдениями за реальным воздействием на морское побережье различных тайфунов и глубоких циклонов над акваториями Японского и Охотского морей, на тихоокеанском шельфе Курильских островов.

Ресурсы современной вычислительной техники вполне обеспечивают возможности заблаговременного моделирования потенциальной опасности различных вариантов развития штормовых нагонов и экстремальных течений в особо контролируемых акваториях в режиме упреждающего прогноза, в том числе с возможностью визуального анализа гидродинамической обстановки по всем другим прилегающим приморским акваториям, которые ранее не подвергались специальным океанографическим изысканиям для картирования проявления опасных явлений на морском побережье.

Практическое использование изобретения востребуется для динамического представления внешних силовых возмущений морских акваторий в процессе постановки и проведения комплексного моделирования, с обоснованием адекватных прогнозов и ориентировочных оценок потенциальной опасности морских наводнений и экстремальных течений вблизи побережья. Такие оценки могут уточняться по мере поступления информации о реальном проявлении опасных морских явлений непосредственно в процессе оперативного контроля и прогноза усиления или снижения опасности морских тайфунов или глубоких циклонов вблизи конкретных участков морского побережья, в бухтах и гаванях морских портов.

Постановка вычислительного эксперимента по моделированию штормовых нагонов

В действующих морских службах оперативного прогноза и предупреждения об опасных природных явлениях требуется использование предельно быстрых и эффективных алгоритмов для реализации прямых вычислительных экспериментов по упреждающему моделированию штормовых нагонов, в том числе с задействованием синоптических прогнозов или возможно опасных маршрутов морских тайфунов и глубоких атмосферных циклонов. Для практической реализации вычислительного эксперимента в регламенте оперативной работы может задействоваться крайне ограниченная гидрометеорологическая информация о реальном состоянии моря и атмосферы в зоне активизации штормовых явлений на море.

Вычислительной и алгоритмической моделью определяется главная часть гидродинамического возмущения по поверхностным градиентам атмосферного давления и спирального распределения направления и интенсивности циклонических ветров, возникающих над морскими акваториями при прохождении тайфунов и глубоких циклонов. Активное действие таких циклонов проявляется в форме корабельных волн, аккумулирующих значительную кинетическую энергию при формировании длинноволновых фронтов морских наводнений над относительно мелководными акваториями, где скорость перемещения атмосферного возмущения становится соизмеримой или большей скорости движения свободных длинных волн по подстилающей водной акватории, либо когда размеры циклонических вихрей становятся соизмеримыми с пучностями собственных колебаний уровня моря вблизи побережья, подверженному активному влиянию прилегающих длинноволновых осцилляторов с высокодобротными частотными характеристиками.

Геометрические размеры атмосферного тайфуна или глубокого циклона могут быть выбраны с гидрометеорологических карт, в том числе прогнозных, по последней замкнутой изобаре. Обычно это соответствует величине 1000 мбар, от которой отсчитывается величина подъема уровня моря в центре циклона ($1 \text{ мбар} = 1 \text{ см}$). Поверхностное напряжение штормового ветра [108] задается максимальной скоростью на высоте 10 м, и эмпирическим коэффициентом C_A – с величиной 0,002 для теплых морей, или $C_A \leq 0,001$ для дальневосточных морей в холодные сезоны года.

Построенный таким образом гидродинамический очаг не привносит в результаты численного моделирования непредсказуемых неопределенностей, связанных со сложным рельефом дна или самовозбуждением сеточных аппроксимаций при нарушении интерполяционной гладкости волновых фронтов. На вновь образуемых фронтах корабельных волн циклонического происхождения присутствуют компоненты высокочастотных длинноволновых возбуждений, которые приведут к возбуждению прибрежные длинноволновые осцилляторы, которые, в зависимости от длительности штормового воздействия, приведут к проявлению метеоцунами с периодами волн порядка 3-5 минут вблизи прибрежных мелководий, и – порядка 12 минут при возбуждении длинных волн на шельфовыми акваториями.

Опыт инженерных построений подвижных очагов атмосферных возмущений от исторических циклонов над Японским и Охотским морями, над тихоокеанскими акваториями шельфа Курильских островов, подтверждает в целом корректность моделируемых процессов зарождения, трансформации при распространении и последующем проявлении морских наводнений и экстремальных течений вблизи контролируемых прибрежных акваторий, а также в закрытых бухтах и гаванях морских портов.

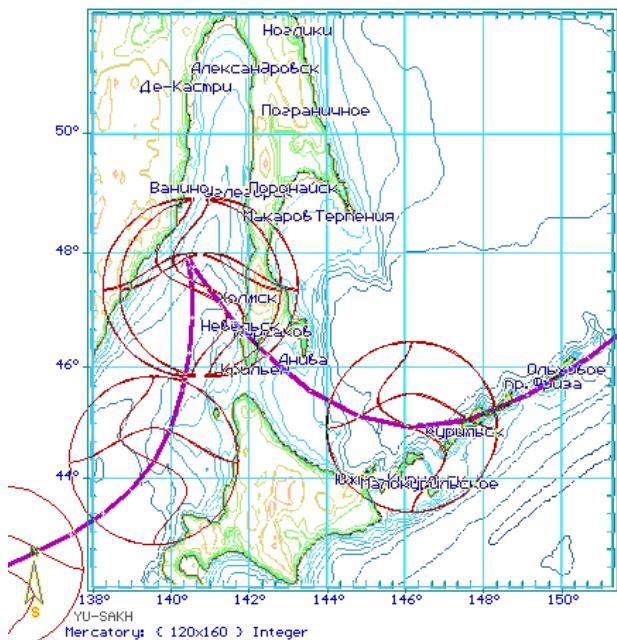


Рис. 2.18. На батиметрической карте Татарского пролива, Охотского моря в Северо-Западной части Тихого океана приведен маршрут с контрольными местоположениями циклона через каждые 6 часов физического времени от начала вычислительного эксперимента. Горизонтальной дужкой внутри круга активного действия циклона показан характер изменения уровня моря; вертикальная кривая отмечает циклоническое направление ветра по спирали против часовой стрелки в северном полушарии Земли. Большая кривизна траектории или практический обратное направление движение циклона связано с его шестичасовым стоянием в одном месте над Татарским проливом.

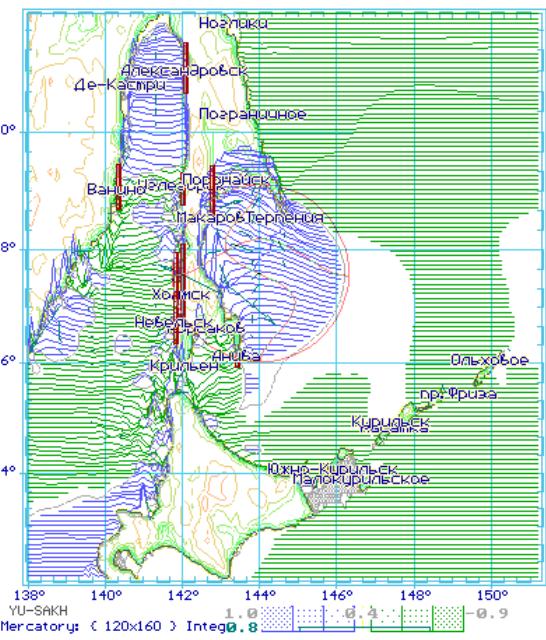


Рис. 2.19. Прохождение циклона над глубоководными акваториями не приводит к большим длинноволновым откликам. Опасное действие атмосферного циклона форме корабельных волн, аккумулирующих значительную кинетическую энергию при формировании длинноволновых фронтов морских наводнений над относительно мелководными акваториями, где скорость перемещения атмосферного возмущения становится соизмеримой или большей скорости движения свободных длинных волн по подстилающей водной акватории. На рисунке видны собственные длинноволновые колебания уровня моря вблизи побережья, действующие после прохождения циклона в сейшевых явлениях.

Представленное гидродинамическое построение источника длинноволновых процессов под воздействием тайфунов и глубоких циклонов над водными акваториями может быть задействовано в качестве внешнего возмущения при постановке и проведении прямого численного моделирования [144] морских наводнений и экстремальных течений вблизи побережья в оперативном режиме и в регла-

ментной работе морских служб прогноза и предупреждения о потенциально опасных морских явлениях.

Практический прогноз штормовых нагонов и экстремальных течений вблизи морского побережья обладает высокой степенью достоверности по времени фактического проявления и интенсивности опасного гидродинамического воздействия тайфунов и глубоких циклонов в открытом море и вблизи побережья.

Практическое построение вычислительной модели атмосферных циклонов выполнено в составе программного комплекса «Ani» [144], в котором реализованы интерактивные графические процедуры для визуального формирования маршрутов и гидрометеорологических параметров атмосферных тайфунов и циклонов в рамках настоящего изобретения.

Заключение по вычислительным моделям

Прикладные задачи гидромеханики, особенно для условий движения жидкости, при которых влияние вязкости, сжимаемости или упругости, является существенным, как правило, поддаются только экспериментальным или опытным исследованиям. Традиционные математические методы в этом случае позволяют сверить обоснованность выбора критериев моделирования и внести эмпирические поправки для учета масштабных погрешностей.

В задачах изучения гидродинамики океана и его прибрежной зоны, масштабные эффекты столь значительно изменяют физические свойства течения жидкости, что опытное моделирование становится принципиально невозможным. В этом случае, современные прямые вычислительные эксперименты, в том числе оперирующие большими массивами батиметрических, гидрофизических и гидрометеорологических данных, дают вполне приемлемые для инженерной практики результаты. Традиционный математический анализ в

этом случае также необходим для постановки формальных критериев корректности вычислений; для поиска асимптотических или эмпирических приближений в тех областях, где критерии существования численного решения не выполняются.

Практическая реализация и внедрение в широкое использование прикладных вычислительных экспериментов в гидромеханике невозможны без детальной проработки графической и интерактивной исполнительной среды для ЭВМ, необходимой для наглядного представления широкого круга задач на основе конкретных моделей гидромеханики. Одновременно, создание большого комплекса программ и проведение серии самых различных вычислительных экспериментов, послужили обоснованием для всех вышеописанных методов программирования и специальных математических моделей.

Глава 3. Программная реализация длинноволновых вычислительных экспериментов

Главным достоинством уже реализованных вычислительных экспериментов является полный интерактивный контроль, выполняемый с использованием унифицированной графической среды, как на этапах постановки прикладной задачи, так и в режиме динамического управления всеми процессами моделирования длинноволновой динамики океана и его взаимодействия с атмосферой.

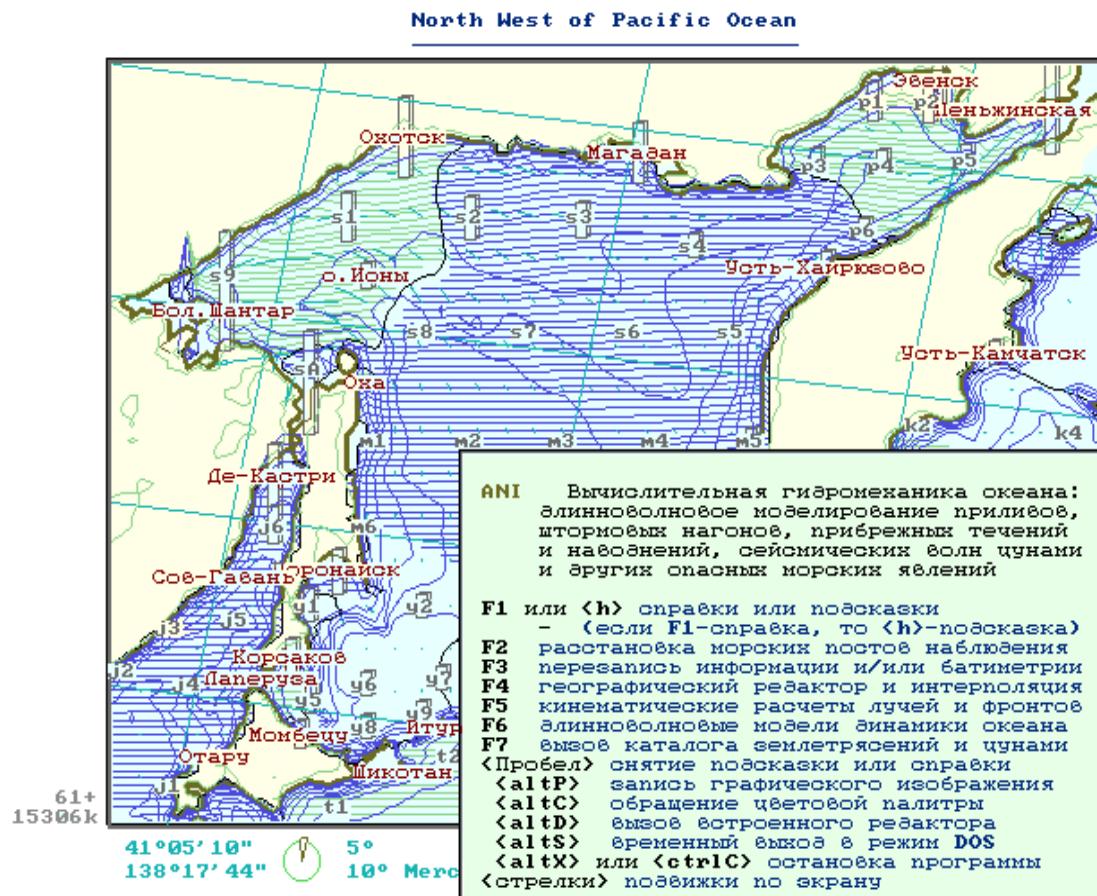


Рис. 3.1. Пример изображения на экране ЭВМ после успешного запуска программы с батиметрией Охотского моря. Выполнена команда **F1**, которая выдала на экран краткое описание основных команд. В нижней строке приводится список основных команд управления программой, который обычно всегда присутствует на экране ЭВМ. Цифры 61+15306k, в левом нижнем углу, означают количество задействованной и свободной оперативной памяти. Сектор в круге показывает направление на север, слева от него указаны координаты левого нижнего угла карты, справа - шаг географической сетки и тип картографической проекции. В правой части подписи всегда показывается название файла, размерность матрицы и тип батиметрических данных

С этой целью была поставлена и решена задача о проектировании сложной графической системы, в которой алгоритмические методы программирования используются с целью достижения максимальной скорости вычислений, а также с учетом необходимости поддержания удобного диалога с океанологом-исследователем. Стилистическая основа вычислительной среды исполнена в правилах “функционального программирования” [8, Баррон, 1980], где математические модели и методы проведения вычислительных экспериментов могут изменяться без опасности разрушения основной структуры программы.

В основе графической системы и математики для картографических преобразований заложена полная тензорная схема преобразования координат с сохранением прямой и обратной матриц трансформации. Это позволяет пользоваться простыми и наглядными правилами пространственных преобразований, и, как оказалось, именно такое решение задачи о преобразовании географических и экраных координат требует минимального числа вычислительных операций.

Кинематическая задача анализа лучей и фронтов

Для моделирования кинематики волновых фронтов была разработана специальная четырехточечная расчетная схема, в которой для сглаживания волновых фронтов используются производные по направлению. В новой 4-х точечной схеме полностью отсутствует проблема проникновения волнового фронта через “тонкие преграды”, предельно точно отслеживаются особенности рельефа морского дна, и при этом расчет ведется существенно быстрее, а для хранения расчетной линии фронта требуется существенно меньше оперативной памяти ЭВМ.

В новом алгоритме расчета волновых фронтов достигнута достаточно высокая гладкость линии фронта, что позволило реализо-

вать быстрый расчет коэффициентов усиления волны цунами на основе модели «сверхдлинных» волн (не зависящих от периода волны). В данной модели используются уравнения одномерного наката с учетом сходимости лучевых трубок (с учетом кривизны фронта).

Для построения лучевой картины были разработаны алгоритмы, использующие дополнительную матрицу, в которой хранятся углы подхода волнового фронта. Затем подобраны схемы интегрирования с автоматически центрирующимися шаблонами, которые позволяют вычислять лучи и фронты с высокой точностью и с очень высокой скоростью, достаточной для быстрой прорисовки луча и фронта вслед за курсором, движущимся по экрану ЭВМ. Необходимо отметить, что для оптимальной прорисовки лучевой картины, нет возможности автоматического выбора углового шага, так как обычно лучи сильно искривлены и часто образуют “каустики” - линии в которые собираются все лучи. Поэтому ускоренное изображение лучей на экране ЭВМ, с ручной отметкой наиболее показательных лучевых линий, является единственным и оптимальным способом графического изображения лучевых полей. Такой же метод необходим для выявления участков побережья с интенсивной сходимостью лучей, участков, на которых будет происходить концентрация волновой энергии в момент первого вступления волны цунами.

Длинноволновой вычислительный эксперимент

В качестве вычислительной модели динамики длинных океанских волн был выбран метод "Конечного объема" [Андерсен и др, 1990], позволяющий описывать физику явления непосредственно в компьютерной или вычислительной терминологии. В данном случае - это модель длинных волн, заданная в потоках, и определенная на сферической Земле с равномерной сеткой в меркаторской проекции. Вычислительная модель построена таким образом, чтобы все дополнительные физические характеристики, как сферичность и вращение

Земли; трение о морское дно и воздействие атмосферы, могли бы отделяться или добавляться к основным уравнениям по команде исследователя в любое время в процессе моделирования. Такие уравнения можно определить как разделяющиеся по физическим параметрам [Белоцерковский, Давыдов, 1982]. Так как при построении вычислительной модели не делалось никаких допущений о малости конвективных и других членов уравнений, то можно считать, что она основана на полных уравнениях гидромеханики [Астарита, Маруччи, 1978], для которых, конечно, необходимо дополнительное исследование реологических параметров моделируемой жидкости [Храмушин, 1990], но такая задача выходит за рамки вопросов о реализации вычислительных экспериментов, освещаемых в данной работе.

Построенный на указанных принципах программный комплекс позволил реализовать моделирование воздействия на поверхность океана атмосферного циклона или тайфуна, который может перемещаться по произвольной криволинейной траектории, заданной временным расписанием движения, плавно изменяя размеры атмосферного вихря, величину атмосферного давления в его центре, скорость максимального ветра, а также коэффициент поверхностного напряжения на границе вода-воздух.

В настоящей версии программы реализовано также прямое динамическое воздействие на поверхность моря со стороны Луны и Солнца, а также обращение к базе данных приливных гармонических постоянных. При простейшем использовании этой базы данных, может быть выбран необходимый комплект приливных гармоник, который в последствии будет применяться как обычная входящая волна на свободных границах расчетной области. Аналогично может быть поставлен эксперимент по моделированию реального приливного режима, для чего реализован метод возмущения уровня

моря вблизи метеографных постов, для которых известны реальные гармонические постоянные. Для восстановления приливного режима необходимо провести длительное предварительное моделирование, пока вынужденные колебания в окрестностях метеографных постов придут к полному согласованию с вынужденными колебаниями во всей водной акватории.

Состав программного комплекса

Комплекс в целом состоит из нескольких взаимосвязанных программ, разработанных в единой унифицированной среде программирования:

ANI – подготовка батиметрических данных, постановка и проведение численного моделирования длинноволновой динамики океана;

MARIO – ведение, интерпретация и анализ временных рядов наблюдений в океанографии и сейсмологии;

WORLD – прорисовка и редактирование каталогов цунами, решение других задач на контурных географических картах;

SPECRM – расчет, визуализация и подготовка полей пространственного распределения спектральных характеристик для метеографных записей;

THREE – оцифровка, слияние и автоматическое редактирование батиметрических массивов;

TV – подготовка и конвертирование батиметрических данных; просмотр и редактирование графических результатов численного моделирования.

С помощью указанных программ поддерживаются файлы (базы данных), которые опознаются в настройках операционной системы по «расширению» имен файлов (второму трехбуквенному имени, которое в полном имени файла указывается после точки):

.inf -> .int, .byt, .dat - батиметрические данные с описанием постов наблюдения;

.chk - полный образ данных (контрольная точка) временно приостановленного вычислительного эксперимента;

.mar - приливы и другие временные ряды наблюдений на морских и сейсмических постах наблюдения;

.tim - данные о приливных постах и гармонических постоянных;

.its - списки сейсмических событий и цунами;

.tv, pcx - черно-белые и цветные рисунки снятые с экрана ЭВМ;

Первый программный модуль - **ANI**. Он предназначен для проведения вычислительных экспериментов по длинноволновой динамике океана. Он состоит из следующих процедур:

1. Ведение базы данных батиметрического материала;
2. Ведение списков метеографных постов наблюдения;
3. Комплекс задач на основе кинематики волновых фронтов;
4. Комплекс задач для проведения вычислительного эксперимента в океанологии для цунами, приливов и штормовых нагонов;

Второй крупный модуль - **Mario**. Это информационно-вычислительный комплекс изначально ориентированный на обработку метеографных данных, получаемых в результате вычислительных экспериментов. Он характеризуется наличием двух больших комплексов процедур:

1. База данных для хранения и обработки метеографных рядов;
2. База данных для работы с годовыми приливными рядами и их гармоническими постоянными;

В программы, содержащие картографическую информацию, встроены утилиты для работы с каталогами землетрясений и цунами. В графической среде встроены процедуры для обработки и печати графических изображений.

Формат представления батиметрических данных

Описание батиметрических данных производится в информационном файле, помеченном расширением (.inf), внутри которого делается ссылка на реальные цифровые данные, сформированные в 0-текстовом (.dat), 1-байтовом (.byt), 2-целочисленном (.int) или 4-плавающем (.dat) форматах компьютера IBM-PC.

**Таблица 1. Образец информационного файла
на примере вышеприведенной батиметрии Анивского залива**

1 Aniva bay	<i>Название или назначение батиметрической карты может быть</i>
2 Merkatory projection	<i>задано в первых двух строках комментариев</i>
3 Aniva.int	
4 2	Type 0:Text; 1:Byte; 2:Integer; 4:Float
5 2	Format 0:Var; 1:Line; 2:Field; 3:Space
6 95 149	Ny Nx <i>Field's Dimension</i>
7 12 16 62 76	Jy Jx Ly Lx <i>Field's Base & Size</i>
8 2230 0 m	Max Min <i>Bathimetry Extreme & Scale</i>
9 1.0 1.3 ' 46	Sy Sx 'Fe <i>Grid's Step, <'dkm> & Lat. of Scale</i>
10 0° 45°10' 140°47'	Cs Fi°Lo° <i>Course, Latitude & Longi-tude</i>
11 5	Nc <i>Number of Marigrams (control points)</i>
87.8 86.5	Korsakov ; 46°38' 142°40'1 24
45°54' 142°06'3	Крильон ; 22 (44/61)
46°21' 143°15'2	Новиково ; комментарий после точки с запятой
; 45°59' 143°24'3	Анива эта строка исключена полностью
52°50' 159°02'	Петропавловск Камчат^ский - в имени до 20 букв
83 108	Озерск 46°33' 143°07'4 26м - здесь имя из одного слова
46°27' 142°25'8	Кирилово ; 23 (77/76)
46°11' 142°16'7	Утесово ; 27 (61/69)
46°15' 141°16'9	Монерон ; 70 (65/23)
46°04' 141°53'3	Кузнецово ; 37 (54/51)
46°41' 141°49'4	Невельск ; 42 (91/48)
46°25' 141°46'8	Шебунино ; 71 (75/46)
45°44' 142°02'4	Лаперуза-пролив ; 65 (34/58)
45°33' 141°58'5	Сириусу ; 33 (23/55)
45°27' 141°41'6	Вакканай ; 24 (17/42)
45°13' 142°21'9	Сарафуцу ; 25 (3/73)
45°50' 141°11'7	Японское-море ; 114 (40/19)
45°37' 143°00'9	Охотское-море ; 112 (27/103)

- 1-2** Две строки комментариев для заголовка к графическому изображению;
- 3** Имя числового файла, где описание пути доступа может быть опущено, если батиметрия находится в той же директории, что и информационный файл, также может быть опущено и само имя файла данных, если это имя совпадает с именем (.inf);
- 4** Тип числовых данных в файле батиметрии: 0 *текстовые(.dat)*, 1 *байтовые 8-бит (.byt)* или 2 *целые 16 бит (.int)*, 4 *плавающий формат IBM PC 32 бит (.dat)*;
- 5** Метод представления числовых данных. В настоящем варианте программы ANI, здесь может быть только число 2;
- 6** Размерность (nY,nX) для полной матрицы в файле батиметрии;
- 7** Смещение и размеры вырезаемого из батиметрии прямоугольника. Первые два числа определяют нижний левый угол, с которого начинается считывание данных, он может быть задан либо целыми числами - индексами матрицы, либо с указанием признака градусной меры с помощью символов (°, ',', "). Размеры считываемого сегмента данных всегда задаются длинами сторон в количестве ячеек;
- 8** Экстремумы (Max, Min) батиметрии и символ единиц измерения в m, cm или dm. Если Max<Min, то это означает, что глубины заданы отрицательными числами, а береговые высоты положительными. В такой матрице производится автоматическое изменение знака у всего массива данных;
- 9** Шаг сетки dY,dX: в градусах или минутах (deg или ') для географической проекции, в метрах или километрах (m или km) для Меркаторской. Если первое число, dY - отрицательно, то это означает, что строки исходной матрицы отсчитываются сверху вниз. Третий символ (m, km, deg, ') определяет тип

проекции, соответственно. Последнее, 4-е число определяет приведенную широту для Меркаторской карты;

- 10** Направление левой границы батиметрии относительно главного меридиана и географические координаты для левого нижнего угла матрицы батиметрии (*как карты*). Координаты задаются в слитном формате: $\pm\text{ddd}^{\circ}\text{mm}'\text{ss}''\text{zz}$ или ^{*)} $\pm\text{ddd:mm:ss}''\text{zz}$, где каждое поле может быть плавающим числом с точкой, а обычное число без символа единиц измерения воспринимается как градусная величина;
- 11** Количество контрольных пунктов, координаты которых задаются в соответствующем количестве последующих строк;
- 12+Nc** В старом формате строки описания пункта наблюдения состоит из индексных координат (kY,kX) относительно полной матрицы батиметрии, за которыми следует только одно слово названия этого пункта. Новый формат описания включается, если в одном из координатных чисел содержится символ градусной меры ($^{\circ}, ',', ''$), тогда координаты считаются географическими, а название собирается из последующих слов пока длина строки не превысит 20 символов. Символ точки с запятой (;) является признаком начала комментария, - который может ставиться также и в начале строки.

Обычно выборка координат пунктов наблюдения производится при старте программы **ANI** или при чтении новой батиметрии из картографического редактора **Chart**. Обычно все пункты, выходящие за пределы считываемого сегмента [Jy+Ly,Jx+Lx], исключаются из списка и не попадают в программу. При повторном считывании координат исключаются также новые точки, которые приближаются на 1/3 размера ячейки к одной из уже имеющихся точек.

^{*)} В определении градусной меры символ ($^{\circ}$) может заменяться двоеточием (:).

Если же считывание батиметрии производится через редактор (**Chart**) вызванный в режиме вычислительного эксперимента (**Simulation**), то новые пункты наблюдения не считаются, а уже имеющиеся в оперативной памяти точки сохраняются без изменений их координат, даже если они выходят за границы расчетной области.

В вышеописанном формате накоплен большой архив батиметрических материалов из мировых океанографических центров данных и других организаций, с которыми выполнялись совместные научные исследования по Дальневосточному региону России.

3.1. Модуль «ANI» - моделирование длинноволновых процессов

Основной программный модуль «**ANI**» позволяет решать следующие задачи:

1. Процедура «**Chart**». Ведение библиотеки батиметрических карт, оцифрованных на меркаторской или географической сетке, с полным комплексом операций по редактированию и трансформации батиметрических данных. Процедура изначально ориентирована на подготовку батиметрических массивов для проведения гидродинамических вычислительных экспериментов, при этом интерполяционные процессы, слияние разномасштабных карт или изменение системы координат: географической на меркаторскую и обратно, может производиться непосредственно в процессе моделирования, и в том числе в автоматическом режиме. Последнее очень важно при построении вычислительных экспериментов на компьютерах с ограниченными вычислительными ресурсами, и позволяет в интерактивном режиме подготовить оптимальную расчетную область объему данных, с учетом необходимого шага координатной сетки и пространственной ориентации батиметрической карты относительно побережья. Здесь же реализованы алгоритмы, в которых при замене

батиметрии производится переинтерполяция всех расчетных полей, созданных в процессе проведения вычислительных экспериментов, а также перенос всех точек – «постов наблюдения» за состоянием моря в строгом соответствии с географическими координатами.

Использование такого программного модуля для быстрого или автоматического приготовления конкретных вариантов батиметрических карт непосредственно в процессе построения гидродинамических вычислительных экспериментов, позволило сохранить весь исторический архив батиметрических материалов в исходном виде, без каких-либо вспомогательных или промежуточных форматов исходных данных.

2. Процедура «**Mario**». Расстановка и редактирование списка постов наблюдения за уровнем моря. Такая расстановка осуществляется либо в диалоге с программой, либо путем вписывания координат в информационные файлы, описывающие батиметрию. При проведении вычислительных экспериментов, в отмеченных постах наблюдения будет отслеживаться уровень моря, они же задействуются для визуализации времени регистрации и экстремальных амплитуд волн цунами. Здесь же реализованы алгоритмы измерения углов и расстояний с учетом сферичности Земли, что необходимо при оптимизации расстановки постов наблюдения. Предусмотрена, также, возможность корректировки глубин, что может быть использовано для моделирования защитных береговых сооружений;

3. Процедура “**Time**”. Построение карт волновых фронтов и лучевых картин для источников произвольной формы, для группы из нескольких источников, в том числе начинаящих свое излучение по заданному временному расписанию, а также построение разностей прихода волн от группы источников излучения в комплексе с точками на защищаемом побережье. Кроме того реализован целый комплекс запросов к программе и специальных задач и алгоритмов,

которые могут быть использованы как для предварительной экспертизы цунами-защищенности побережья, так и в оперативных службах предупреждения о цунами.

- Построение карт изолиний времен добегания до пары произвольных точек и построение гидрофизических зон молчания для защищаемых береговых пунктов.

- Решение задачи о заблаговременности предупреждения и поиск зоны ответственности для гидрофизических постов наблюдения за уровнем моря.

- Оптимизация расстановки гидрофизических постов при проектировании и анализе гидрофизической подсистемы предупреждения о волнах цунами.

- Оперативный анализ концентрации волновой энергии на побережье, сразу же после определения формы источника цунами или после задания географических координат для цунамигенного землетрясения.

- Решение задачи оконтуривания очага цунами, путем расчета обратных изохрон для пунктов наблюдения за уровнем моря, при этом возможен старт "обратных" волн из этих пунктов по заранее составленному временному расписанию.

- Оперативное использование каталога землетрясений и цунами, по которому можно анализировать кинематику волн от исторических цунами.

4. Процедура “**Simulation**” (*Waves*). Проведение вычислительного эксперимента при оперативном или исследовательском моделировании длинноволновых процессов в океане от различных источников, которое допускает решение следующих задач.

- Численное моделирование приливного режима с учетом сферичности и вращения Земли, а также сил придонного трения. Данная задача предназначена для непрерывного моделирования приливного

режима, с помощью которого может быть получена информация о приливных режимах уровня моря и течений в любой точке расчетной области. Такое моделирование необходимо также для последующего моделирования цунами и штормовых нагонов на фоне реального прилива, которое может делаться в оперативном режиме с целью прогноза гидрофизической обстановки на побережье.

- Оперативное моделирование воздействия волн цунами на побережье в режиме, когда вычисления производятся быстрее чем реальное распространение волн цунами. В этом случае, после сообщения о наблюдении экстремума волны цунами на ближайшем к эпицентру землетрясения посту, возможно реальное прогнозирование воздействия цунами во всех других береговых пунктах. В случае принятия решения о тревоге цунами, с помощью указанного вычислительного эксперимента возможно предупреждение населенных пунктов о реальном времени прихода и повторении больших волн цунами, а также возможно получение прогноза о времени затухания волнового процесса до безопасного уровня.

- Численное моделирование штормовых нагонов, вызываемых прохождением атмосферных циклонов и тайфунов. В настоящее время реализовано моделирование циклона (тайфуна) проходящего по заранее заданной гладкой (сплайновой) траектории. В программе же, заложены алгоритмы позволяющие перестроить программу на считывание и интерполяцию реальных полей атмосферного давления и скорости ветра, в соответствии с форматами представления числовой информации, которые доступны в оперативном режиме на синоптических постах, и которые используются в настоящее время при прогнозе погоды.

- Использование алгоритмов, в которых физические параметры математической модели разделены алгоритмическими методами и могут включаться, выключаться или изменяться в ходе решения за-

дачи. Аналогично разделено задание и изменение граничных и начальных условий, которые также могут быть переустановлены в процессе решения.

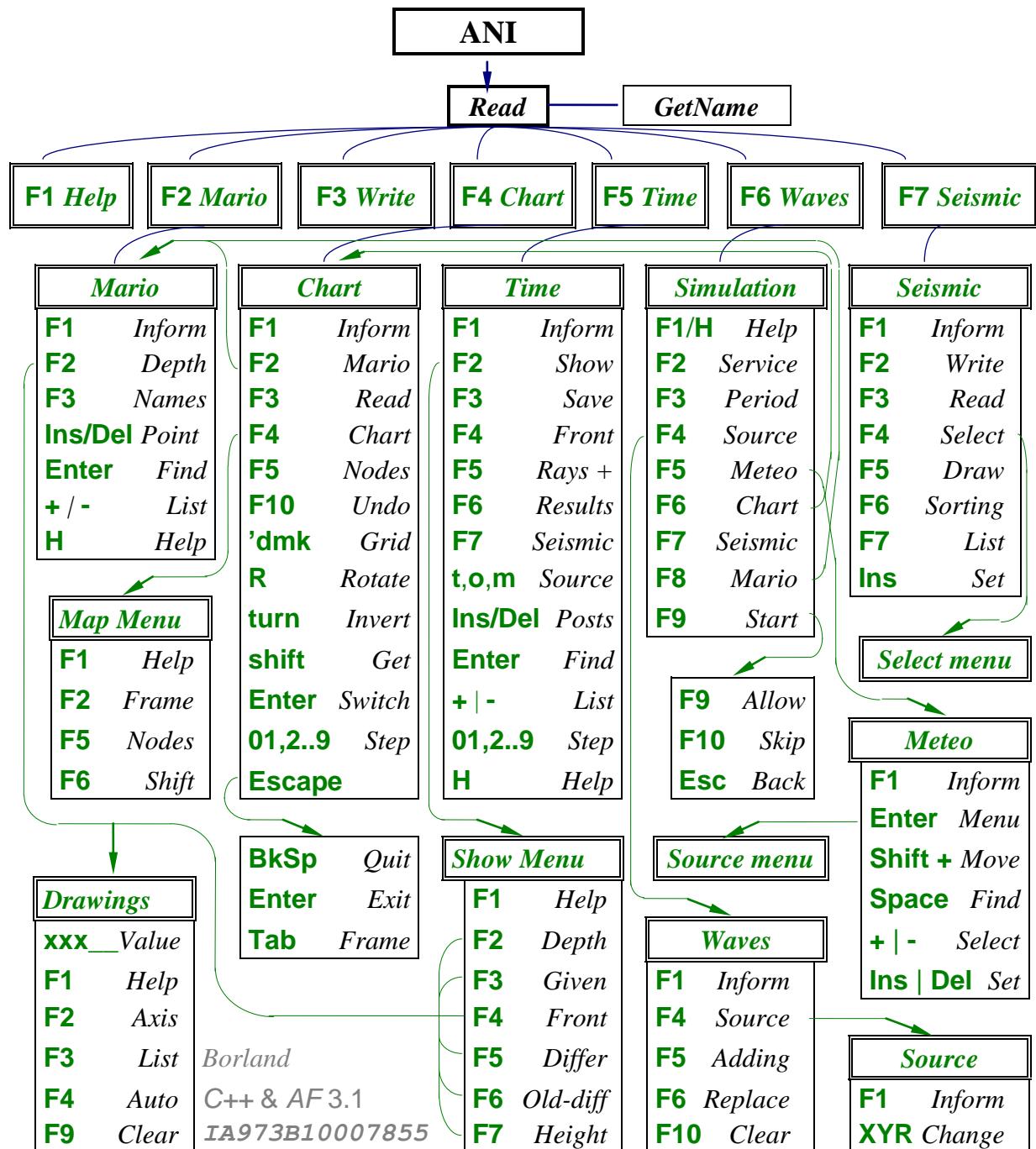
- Предусмотрено несколько методов визуализации волнового поля, которое может быть осуществлено в виде квази-трехмерного поля, поля изолиний уровня или цветных штриховых закрасок, или комбинации из этих изображений. На эти поля также могут быть наложены стрелки векторного поля потоков или скоростей течения. Моделирование распространения волн может быть остановлено по команде с клавиатуры, и затем произведена перестройка расчетной области или физических характеристик численной модели, добавлено новое внешнее возмущение и продолжен расчет.

5. Процедура “**Seismic List**”. База данных с графическим и табличным представлением истории сейсмических событий и цунами, которые представляются в режиме иллюстративной графики. События из этой базы данных могут выбираться непосредственно из процедур кинематического (**Time**) и динамического (**Simulation**) моделирования.

- Каталоги землетрясений и цунами обслуживаются интерактивной системой, которая позволяет оперативно делать выборки из каталога, сортировать его и осуществлять поиск конкретных записей. Каталог оформлен также и в виде отдельной программы: **WORLD**, которая в обычном режиме выполняет предварительное вычисление размеров региона и показывает на экране карту с нанесенными на нее событиями.

- Основной режим использования каталога - это подфункция из комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов, где при обращении к каталогу с указанием конкретного географического региона фактически подготавливается информация для анализа сейсмической активности и цунами в исследуемой области.

Функционально-логическая структура программного модуля



Формат запуска программы из командной строки имеет стандартный для всех операционных систем вид:

>ANI.exe D:\Path\FileName.inf При запуске программы можно указать имя информационного файла.

Файлы, содержащие батиметрические материалы и их текстовое описание, являются обязательными исходными данными для

программы **ANI**. Цифровая батиметрия определяется с помощью прямоугольного массива чисел, оцифрованных на равномерной прямоугольной сетке, которая может быть либо в Меркаторской, либо в географической проекции. Описание батиметрических данных производится в информационном файле, помеченном расширением (.inf), внутри которого делается ссылка на реальные цифровые массивы, сформированные сплошным потоком в файлах в текстовом или плавающем (.dat), целочисленном (.int) или байтовом (.byt) форматах.

Во всех режимах работы программного комплекса на графическом экране ЭВМ изображаются географические карты, метеографические записи или другие результаты расчетов, и информационная строка с обозначением активных на данный момент команд управления исполняемой процедуры.

В случае проведения длинноволновых вычислительных экспериментов, комплекс программ обеспечивает ведение подробного протокола с описанием всех условий моделирования и всех действий исследователя по управлению процессом вычислений, а также поддерживает оперативную регистрацию состояния моря в заранее указанных постах наблюдения.

Если моделирование производится на компьютере подключенном к локальной вычислительной сети, то с другого компьютера допускается просмотр результатов и протоколов вычислений. Предусмотрен также режим рестарта с контрольной точки, который также можно использовать для продолжения вычислений после временной приостановки вычислительного эксперимента или для дублирования расчетов с другими параметрами внешнего возмущения, осуществляемых, к примеру, на дополнительном компьютере, работающем в той же локальной сети.

Процедура расчетов и построения кинематических полей

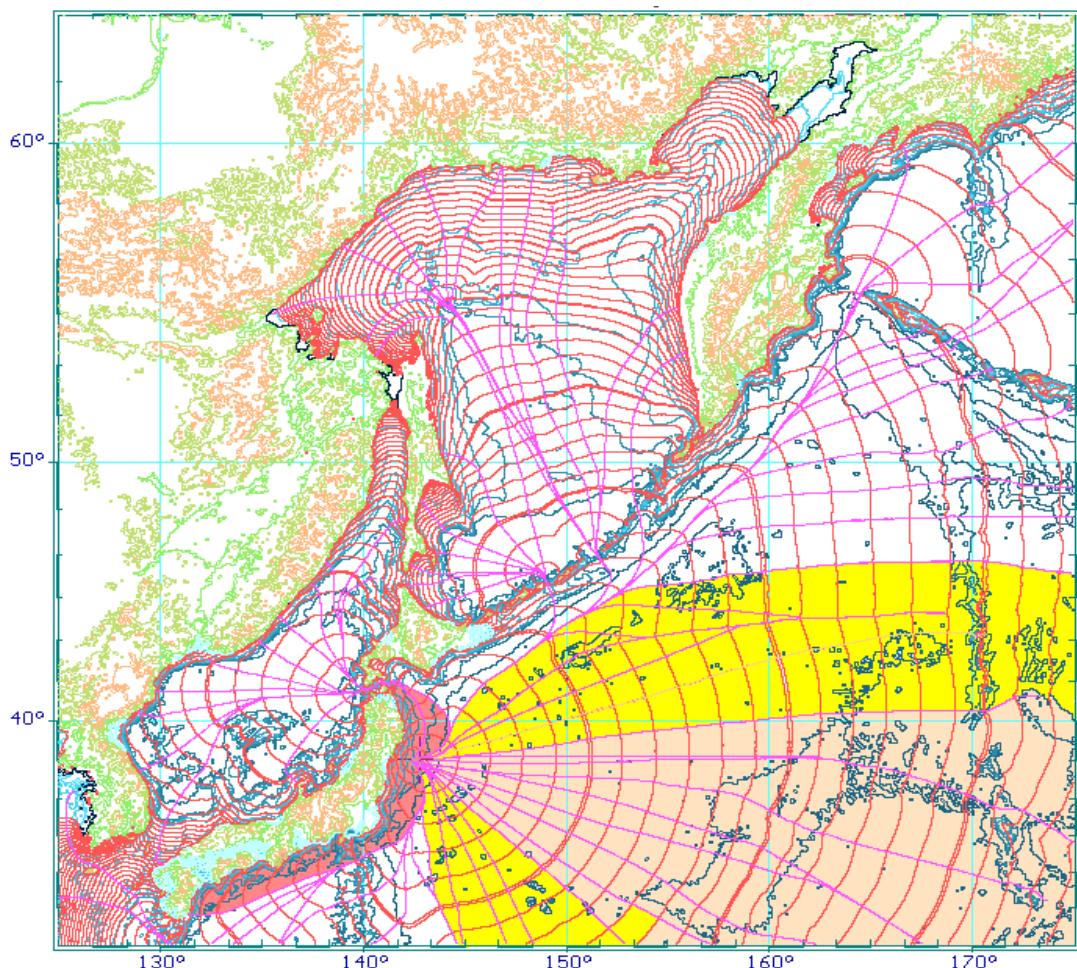


Рис. 3.2. Ортогональная сетка, составленная из лучей и фронтов длинных волн для цунами 11 марта 2011 г. Фоновой закраской показаны основные потоки энергии во фронте волны цунами.

Процедура **Time** предназначена для выполнения быстрой экспертизы цунамизащенности побережья с помощью следующих задач:

- ⇒ Решение задачи о заблаговременности предупреждения и поиск зоны ответственности для гидрофизических постов.
- ⇒ Оптимизация расстановки гидрофизических постов при проектировании и анализе гидрофизической подсистемы предупреждения о волнах цунами.
- ⇒ Оперативный анализ концентрации волновой энергии на побережье, сразу же после определения формы источника цунами или географических координат для цунамигенного землетрясения.

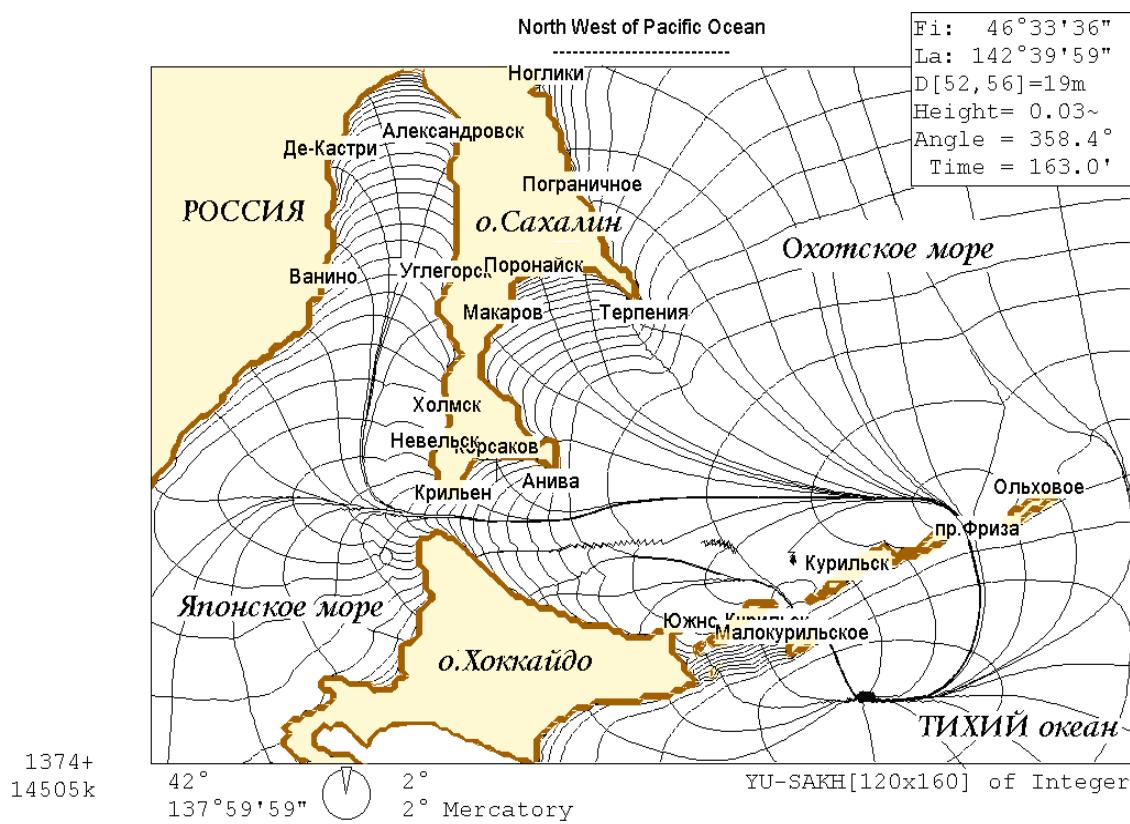


Рис. 3.3. На рисунке показана ортогональная сетка, составленная из лучей и фронтов волн для землетрясения и цунами 5 октября 1995 года.

При работе процедуры **Time** на экране изображается географическая карта региона, по которой перемещается активный маркер. Второй – невидимый маркер проявляется при удержании **<Shift>**. Информация о координатах, глубине моря и другие расчетные величины могут выводиться в правое верхнее текстовое окно.

Проведение полного вычислительного моделирования

Список основных задач процедуры ‘**Simulation**’.

⇒ Численное моделирование с учетом сферичности и вращения Земли, придонного трения, атмосферного давления и воздействия ветра, а также астрономического влияния Луны, Солнца и вынужденных возмущений уровня моря на открытых границах или в точках с координатами существующих метеографов. Возможно проведение моделирования с распараллеливанием текущих рас-

четов на нескольких компьютерах в локальной сети, что позволяет проводить одновременные уточненные расчеты цунами и штормовых нагонов сразу для нескольких защищаемых пунктов на побережье.

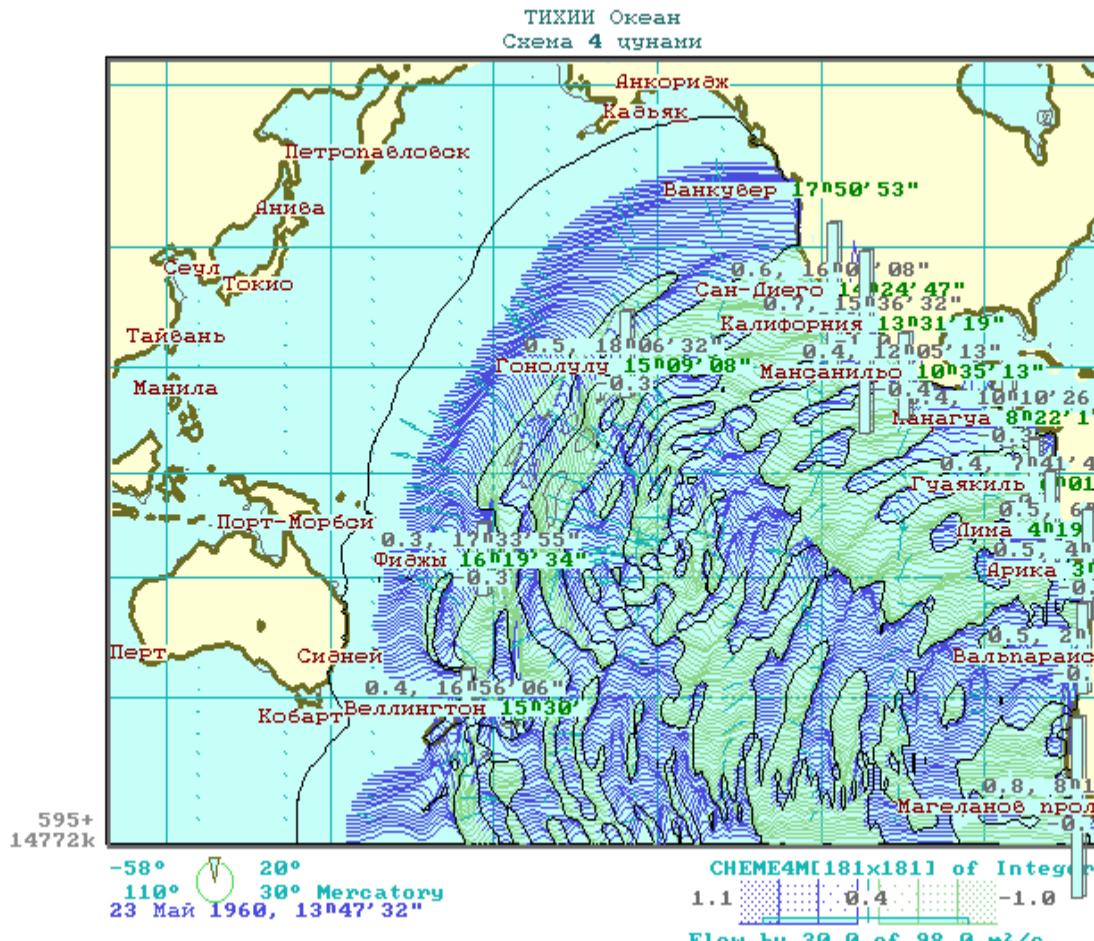


Рис. 3.4. Пример отображения на экране ЭВМ текущих результатов расчетов в процессе проведения вычислительного эксперимента.

⇒ Оперативное моделирование воздействия волн цунами на побережье в режиме, когда вычисления производятся быстрее, чем реальное распространение волн цунами. В этом случае, после сообщения об обнаружении волны цунами на ближайшем из постов наблюдения по отношению к источнику землетрясения, возможно реальное прогнозирование воздействия цунами во всех других береговых пунктах. В случае принятия решения о тревоге цунами, с помощью указанного вычислительного эксперимента возможно предупреждение населенных пунктов о реальном времени

прихода и повторении больших волн цунами, а также получение прогноза о времени затухания волнового процесса до безопасного уровня.

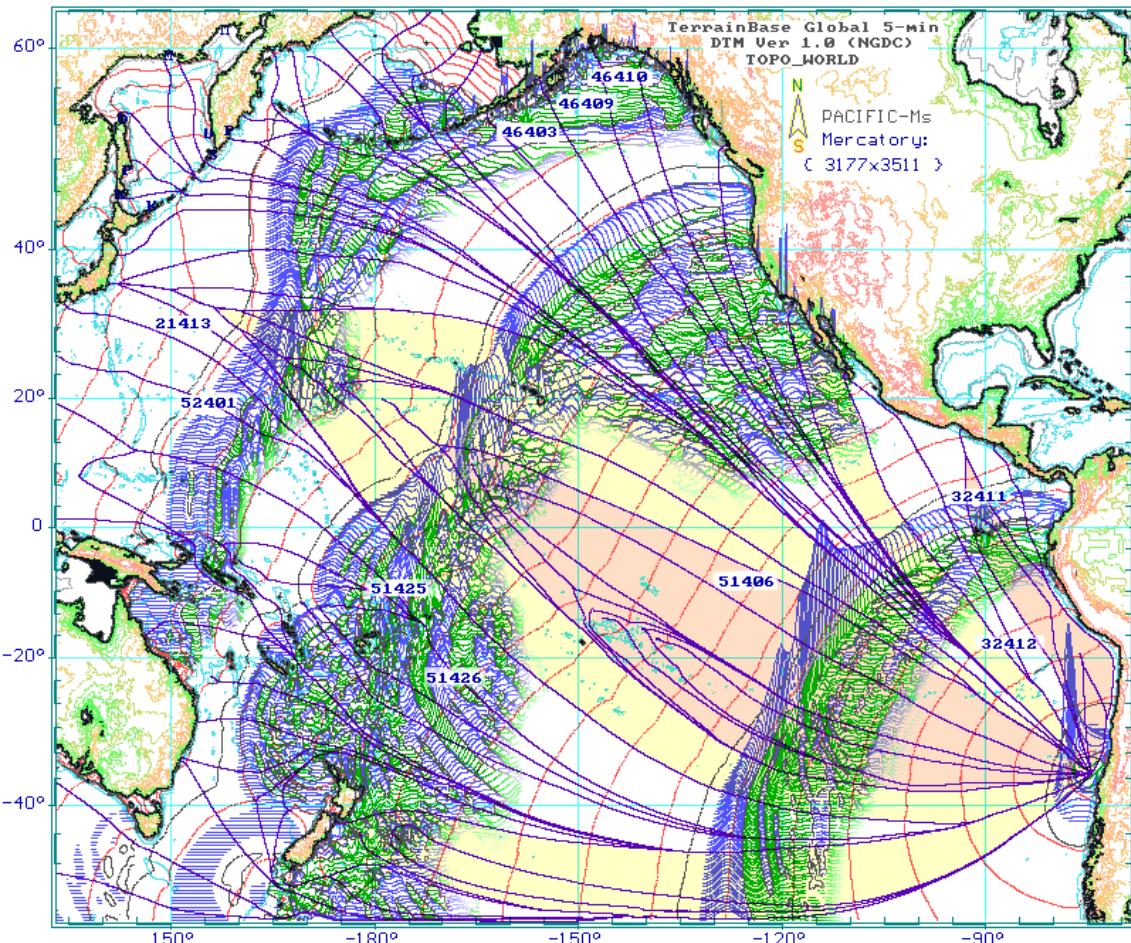


Рис. 3.5. Синтезированное отображение результатов вычислительного эксперимента при оперативном моделировании чилийского цунами 2010.02.27.

- ⇒ Численное моделирование штормовых нагонов, вызываемых прохождением атмосферных циклонов и тайфунов. В настоящее время реализовано моделирование циклона (тайфуна) проходящего по заранее заданной сплайновой траектории. В программе заложены алгоритмы, позволяющие перестроить программу на считывание и интерполяцию реальных полей атмосферного давления и ветровых потоков в соответствии с форматами представления числовой информации, которые доступны в оперативном режиме на синоптических постах, и которые используются в настоящее время при прогнозе погоды.

Доступ к историческим архивам по землетрясениям и цунами

Процедура “**Seismic**” обеспечивает просмотр и быструю выборку сейсмических событий. Формат каталога строится как последовательный поток числовых данных, разделенных пробелами:

YYYY	MM	DD	hh	mm	ss.s	±FF.ff	±LLL.ll	DDD	M.s	II.i	HHH.hh
1952	11	4	16	58	21.6	52.75	159.50	30	8.5	4.0	20.00
1953	3	17	13	4	42.0	50.00	156.40	70	6.2	1.0	3.00
1964	3	28	3	36	13.9	61.05	-147.48	23	8.5	4.0	51.80
1964	6	16	4	1	39.9	38.35	139.18	40	7.5	2.0	6.40
1965	2	4	5	1	21.8	51.30	178.60	36	8.2	2.5	10.00
1982	3	21	2	32	5.9	42.15	142.55	43	7.2	0.0	1.30
1983	5	26	2	59	57.5	40.36	139.08	20	7.8	2.0	18.00
1983	6	21	6	25	25.0	41.26	139.00	6	6.9	0.0	1.00

Дата и Гринвичское время, ↗ географические координаты,
 ↗ глубина очага и
 ↗ магнитуда землетрясения,
 ↗ интенсивность и
 ↗ высота цунами

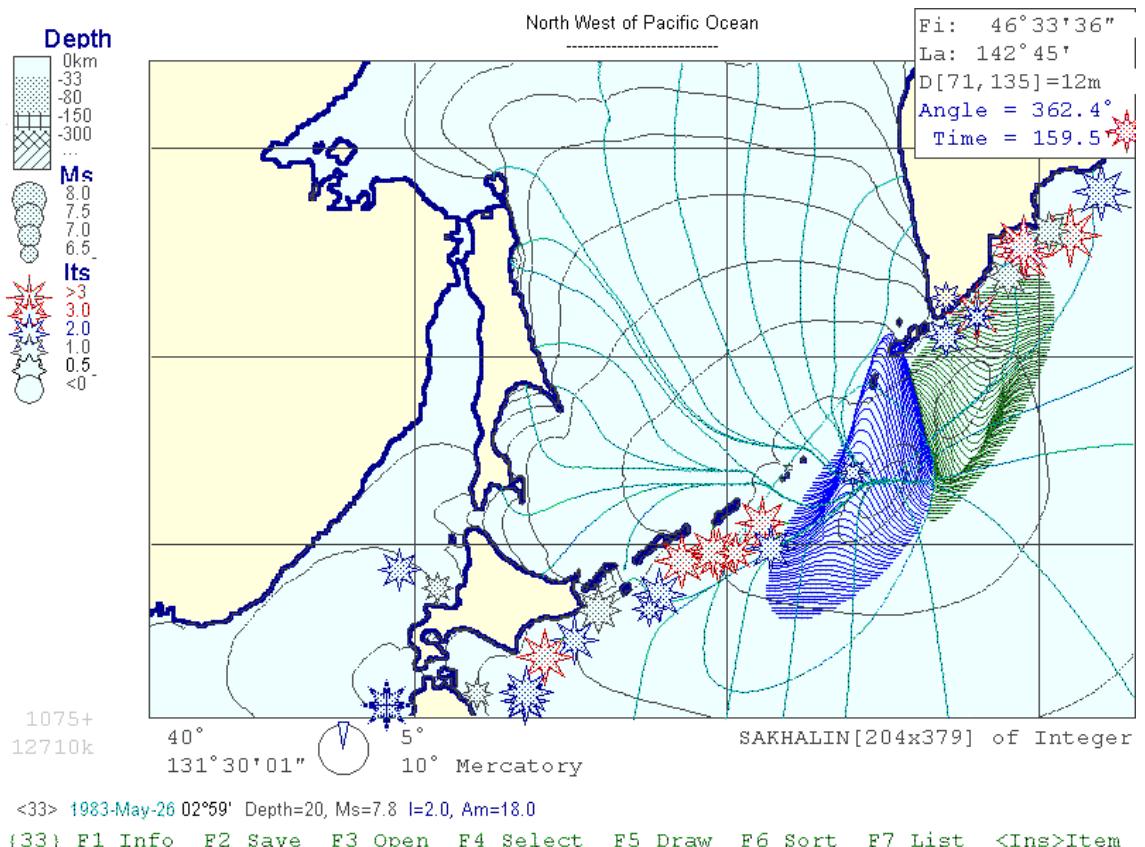


Рис. 3.6. На рисунке изображены лучи и фронты от гипотетического источника цунами на Средних Курилах, показан сам источник и на суммарное изображение наложены исторические очаги землетрясений и цунами. Курсор остановлен на событии 26 мая 1983 года. Слева от рисунка показана легенда, характеризующая сейсмические события и интенсивность вызванных цунами.

3.2. Модуль «MARIO» - анализ временных рядов

Mariograms Treatment

- R/W** <Ani> special format
- I/O** for other data files
- XYZ** <Ani><Grid><Mesosaur>
 - L** List of series
 - F** Three - function group
 - T** **Tidal sea** oscillation
 - S** Visible configurations
 - E** Initial present series
 - C** Exact copy this series
 - M** Move down, marker off
 - D** Delete market series
 - <**Enter**> series editor
 - <**Up-Down-Ins**> Mark series
 - <**Home-End-Del**> Boundary
 - <**Left-Right**> Bound shift
 - <**PgUp-PgDn**> Window shift
 - <**0 |1**> Series | Screen step
 - <**2:9**> Step multiplier
 - Use **6 + 1524k** memory

Block operations

- F + Block - F**
- F * Block / F**

Simple operations

- F + 0.000 - F**
- F * 1.000 / F**
- F-Mid F-F(o)**
- Log Exp**
- Log10 Exp10**

? Tun
отметки

Tide

Series transformation

Two point move $0 < \underline{0.96} < 1$
Kaiser-Bessel $\underline{24}$ points
Kaistrenko $\underline{60}$ m to $\underline{12}$ km
Tide Gauge to **Ocean Level**
Tie the Record $\underline{36} / \underline{256}$

F1 New F2 Both series

Tide Well Diameter $\underline{1.00}$ m
Intake Pipe Diameter $\underline{0.10}$ m
Intake Pipe Length $\underline{2.00}$ m
Intake Pipe Number $\underline{1}$.

F2 ReDraw F3 ReView F4 Refer

Series Editor

- <**PgUp/PgDn**> Select
- <**Enter**> Correct value
- <**BkSp**> Interpolation
- <**Space**> Find threshold
- <**1.0**> Marker step
- 0.200** threshold
- 3** image degree

Initial series

"Name for series"
Date **1983:05:26**
Latitude **41°15'0"**
Longitude **139°51'7"**
Begin **14°00'00"0**
Step **0'30"0**
Format: **Integer**

Minima < Len < Extreme

Visualization Parameters

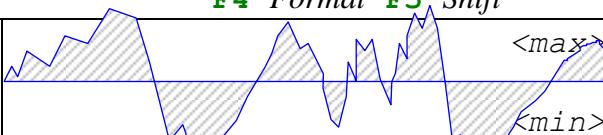
Beginning **1993:8:1 3°44'6"**
Duration **31** days **5°43'21"**
Interpolation Step **1°01"**
Interpolation Power **1**
Dimensions for Time & Function
Remove axis ? **NO NO**
Grid lines ? **YES YES**
On per-unit ? **NO NO**
Axis Legend ? **YES YES**
Captions ? **YES NO**

ПРОЦЕДУРА СЧИТЫВАНИЯ / ЗАПИСИ ИНОРОДНЫХ ДАННЫХ

"Заголовок для числового ряда"
D:\Path\<**fileName**.ext< или маска ***.***
Read Text set **0** by **1** plus **0**

<S.Len> F1 Example F2 I/O F9 Clear

↳ "Заголовок для примера"
 $F = \underline{S.A} \cdot \sin(\underline{S.Q} \cdot \pi \cdot k / \underline{S.Len}) \pm \underline{A.r}$



Второй крупный программный модуль - **MARIO**, предназначен для организации хранения и обработки временных рядов наблюдения за уровнем моря и приливным режимом, он может быть использован также при работе с сейсмологическими и другими данными.

Разработка программы **MARIO** вызвана необходимостью обработки большого количества метеографических данных, получаемых как результаты вычислительных экспериментов. Затем блок задач расширялся, в частности, были реализованы задачи позволяющие систематизировать наблюдения за приливами и работать с каталогами их гармонических постоянных.

Форматы для представления метеографических рядов создавались с целью унификации представления наблюдений за уровнем моря и для обеспечения доступности ранее накопленных материалов для широкого круга исследователей. С каждым временным рядом связано его описание, которое состоит из названия пункта, его географических координат, времени начала наблюдений, дискретности, длины ряда и способа его представления в базе данных.

В процессе решения различных задач по обработке результатов наблюдений за уровнем моря управляющая программа пополнялась соответствующими алгоритмами. В настоящее время с рядами можно проделывать операции по редактированию, восстановлению и интерполяции. Реализовано множество арифметических операций, 4 алгоритма фильтрации, пересчеты наблюдений с морских точек на береговые, а также с моря на метеограф и обратно.

Программа MARIO поддерживает базу данных для работы с годовыми приливными рядами и их гармоническими постоянными, состоящую из интерактивной системы для работы с приливными гармоническими постоянными и процедурами поддержки годовых рядов наблюдений за уровнем моря в специализированном формате, который учитывает особенности оцифровки метеограмм на гидро-

метеопостах, а именно – возможные пропуски данных, случающиеся при нештатных остановках метеографов.

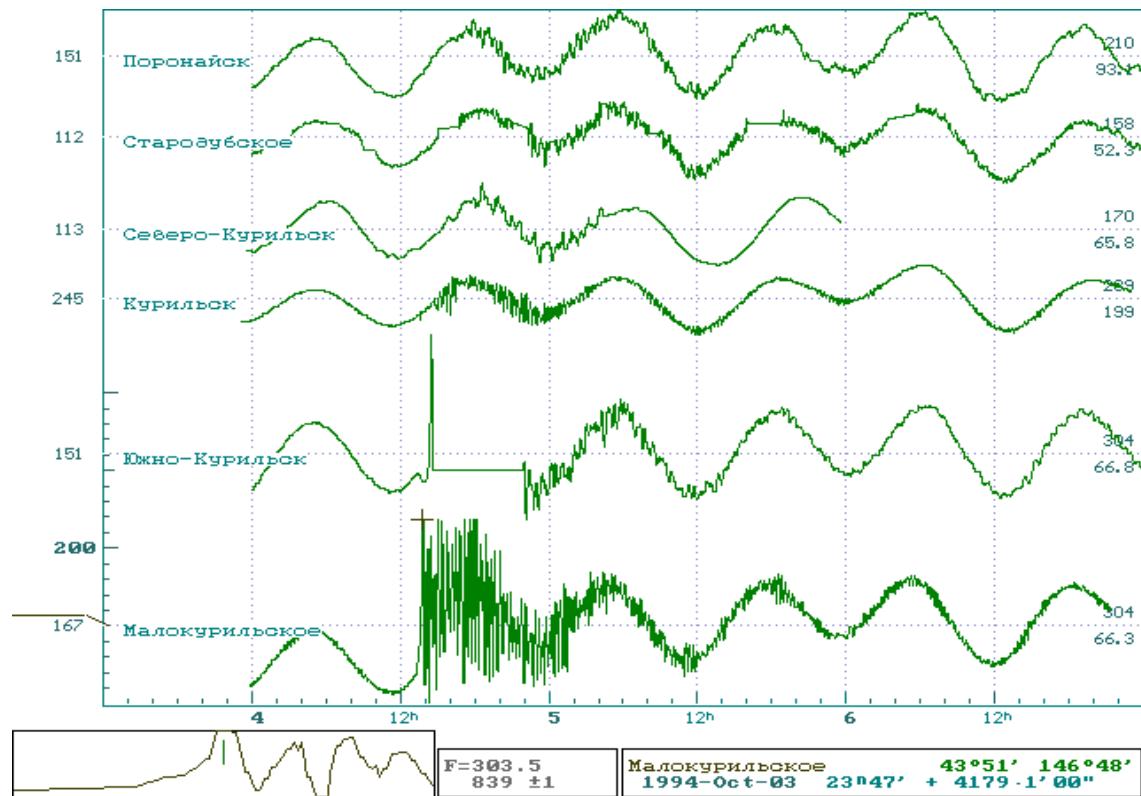


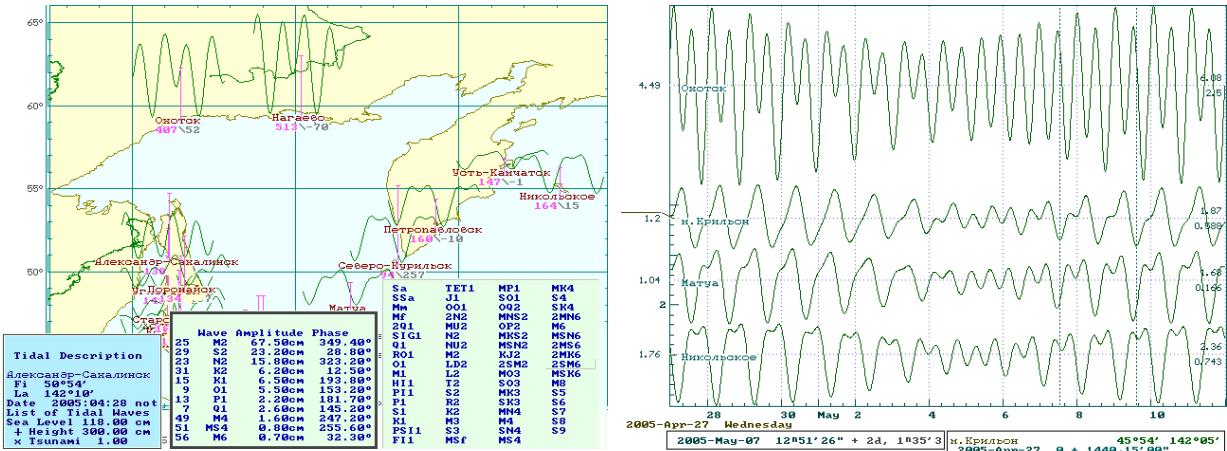
Рис. 3.7. Образец графического представления временных рядов с записями цунами на российских метеографах в октябре 1994 года.

Программа MARIO адаптирована к использованию в оперативной службе цунами, где она активно используется в качестве системы управления базой данных для наблюдений за уровнем моря. В ее форматах накоплено большое количество записей цунами, приливных рядов и гармонических постоянных. Высокая разрешающая способность временной шкалы допускает хранение, визуализацию и обработку также и сейсмических данных.

В программу MARIO были включены специализированные методы обработки временных рядов. Кроме простых операций с рядами, как сложение, перемножение и логарифмирование, встроены также несколько фильтров, функции пересчета волны цунами с морских точек на береговой откос и на показания метеографа, и другие.

Для Морского отдела Сахалинского УГМС, в программу MARIO был встроен большой блок для работы с годовыми приливными рядами, который предназначен для обработки данных в том виде, в котором они обычно подготавливаются в этой службе. При этом приливные ряды могут быть конвертированы в формат MARIO как из текстовых форматов, принятых в Сахалинском УГМС, так и из форматов Мирового центра океанографический данных (ВНИГМИ-МЦД), в которых имеются большие исторические архивы.

Блок процедур для анализа приливного режима был подготовлен для использования в оперативный службе Сахалинского Центра Цунами. На рис. 2.7а показаны текстовые таблицы, появляющиеся при формировании архивов приливных гармонических постоянных.



а) Географическая карта с отрезками приливных рядов. В нижней части рисунка показаны списки приливных гармонических постоянных.

б) Специализированный формат представления суточного приливного ряда, который используется оперативными дежурными Сахалинского Центра Цунами.

Рис. 3.8. Визуализация приливного режима в пунктах, по которым Сахалинский Центр Цунами подает тревогу цунами.

С помощью программы Mario планировалось автоматизировать обработку метеорологических записей, получаемых на действующих постах Сахалинского УГМС. Были созданы дополнительные процедуры для конвертирования данных из стандартных форматов УГМС в формат программы MARIO, которые включали в себя средства для поиска и исправления ошибок. Разработана также процедура для об-

работки оцифрованных мореограмм. К сожалению, когда эти работы были доведены до первого этапа опытной эксплуатации, они были временно приостановлены.

Также как и процедуры для выполнения океанологических вычислительных экспериментов (ANI), программа Mario предлагается для свободного использования при выполнении любых исследовательских или оперативных работ. Авторы будут благодарны за любые предложения по включению в программу MARIO новых алгоритмов для обработки мореографических рядов, или о методах совершенствования этой программы.

3.3. Основные варианты практического использования программного комплекса

Расстановка мореографических постов наблюдения

F2 Mario - на экране появляется подвижный курсор в виде крестика, который перемещается с помощью стрелок на клавиатуре или "мышки". С помощью команды **<F1 Inf>** в левом верхнем углу экрана выставляется или убирается окно с информацией о местоположении подвижного курсора.

Для установки нового поста наблюдения, необходимо подвести курсор в нужную точку и нажать клавишу **<Insert>**. В нижнем левом углу появится запрос на ввод названия поста наблюдения.

Быстрая установка курсора на один из существующих постов наблюдения выполняется с помощью команд: **<Enter>** - с поиском ближайшего к курсору поста; **<+>** или **<->** - перебор уже установленных точек по списку. Когда же курсор установлен на мореографическую точку, то она может быть удалена по команде **<Delete>** или перемещена на другое место, если при перемещении курсора удерживать нажатой клавишу **<Shift>**. Закрепление поста на новом месте выполняется по команде **<Shift+Enter>**.

Если включено информационное окно **<F1 Inf>** и курсор передвигается с удерживаемой клавишей **<Shift>**, то в окне появляются две дополнительные строки с информацией о расстоянии и азимутах между двумя контрольными точками, которые соединены линией на изображенной на терминале карте. Вторая точка совмещается с подвижным курсором по команде **<Shift+Delete>**, по команде **<Shift+BkSp>** эти две точки меняются местами.

При включенном информационном окне может быть использована также команда **<BkSp>**, которая позволяет скорректировать значение глубины в точке под подвижным курсором.

Корректировка списка мариографных точек производится только в оперативной памяти программы ANI, поэтому, после завершения расстановки постов наблюдения необходимо выйти на главный уровень по команде **<Escape>**, и сохранить данные по команде **<F3 Write>**, указав, при необходимости, режим обновления информационного файла [**Inf only**].

Редактирование батиметрических карт

F4 Chart - на экране появляется подвижная рамка оконтурирующая текущую матрицу батиметрии. Стрелками на клавиатуре перемещается верхняя и правая границы рамки, если же удерживается клавиша **<Shift>**, то перемещается вся рамка. **<Enter>** переключает режимы смещения всей рамки и верхней - правой границы. Буква **<R>** вращает рамку против часовой стрелки, **<r>** - соответственно, в другую сторону.

Все параметры батиметрической матрицы и ее картографической проекции могут быть определены в специальной таблице, которая вызывается по команде **<F4 Edit>**. Необходимо отметить, что когда в таблице изменяется сеточный шаг или размерность матрицы, и если нажимается **<Enter>** в тот момент, когда курсор находится в

поле измененного числа, то программа пытается подстроить другие параметры карты так, чтобы рамка осталась на старом месте.

Для выхода из редактирования дается команда *<Escape>*, за которой следует запрос о способе выхода из процедуры. *<Enter>* означает, что исправления сделанные в процедуре принимаются, *<BkSp>* отменяет все корректировки. Если в процессе редактирования считывались другие карты, то по *<BkSp>* возвращается последняя из прочитанных батиметрических карт.

Кинематические расчеты волновых фронтов и лучей

F5 Time - диалог построен

также как в *<F2 Mario>*, здесь тоже можно редактировать список постов наблюдения и проводить измерение расстояний. В простейшем случае достаточно подвести курсор к заданной точке или выбрать эту точку из каталога исторических событий *<F7 Seismic>*, затем по команде *<F4 Front>* запустить процесс моделирования распространения фронта цунами. Времена пробега волны до отмеченных постов наблюдения могут быть просмотрены при вызове списка *<F6 List>*, а сформированный на экране список может быть выведен в текстовый файл с помощью команды *<F2 Write>*.

Если немного подождать, пока по команде *<F5 Rays>* будут подготовлены данные для быстрой прорисовки лучей и фронтов, то луч и (или) фронт будет рисоваться в том же темпе, что и движение активного маркера. Команда *<Tab>* закрепляет линию луча и фронта на экране.

Для задания сложного по форме источника или нескольких источников сразу, можно воспользоваться буквой *<T>* - для установки одного источника и задания относительного времени его срабатывания; буквой *<O>* - для задания одной точки источника с тем же относительным временем; *<M>* - начинают отмечаться все точки, по которым проходит курсор. Повторное нажатие клавиши *<M>* отме-

няет отметку точек источника, отметка отменяется также в случае запуска процесса расчета изохрон **<F4 Front>**.

Команда **<F3 Save>** переключает процедуру **Time** в режим расчета разностей времен добегания от различных точек регистрации фронта волны. В момент первого срабатывания **<F3 Save>** происходит сохранение поля времен пробега волн, которое затем всегда вычитается из последующих расчетов. Повторное исполнение **<F3 Save>** приводит к сохранению матрицы разностей, и последующие расчеты будут только корректировать сохраненные разности. Для удаления матриц разностей времен добегания и восстановления режима расчета поля времен добегания, необходимо вернуться на главный уровень программы **ANI** и снова войти в процедуру **<F5 Time>**.

Для прорисовки результатов можно вызвать **<F2 Service>**, где будут предложены обращения к программе рисования изолиний с матрицами данных, которые уже распределены в оперативной памяти. Здесь же происходит настройка режимов быстрого интегрирования лучей и фронтов, а также включение алгоритмов для расчета коэффициентов усиления и делается указание на заполнение поля идентифицирующего излучатели.

В настоящей версии программы не предусматривается получение других результатов, кроме как в форме протоколов со списками постов наблюдения, а также в виде графических изображений на экране ЭВМ, которые могут записываться в файлы растровых изображений или печататься на принтере.

<i>Моделирование распространения волны цунами</i>	 	F6 Simulation - вызов комплекса процедур для моделирования длинноволновой динамики океана, которое может быть использовано для анализа обстановки на побережье и предупреждения населения об опасности конкретной волны цунами.
--	-----------	--

Для запуска вычислительного эксперимента необходимо иметь батиметрическую карту охватывающую очаг землетрясения и защищаемое побережье. Желательно до начала моделирования сформировать в информационном файле список постов наблюдения за уровнем моря. Программа ANI должна получить информационный файл этого региона в качестве дополнительного параметра командной строки. После того как карта будет изображена на экране необходимо перейти в режим моделирования <**F6 Simulation**>.

Для установки очага землетрясения необходимо вызвать меню <**F4 Source**>, и заполнить в нем координаты очага землетрясения, задать размеры очага и амплитуду в источнике. Если размеры и амплитуда неизвестны, то можно воспользоваться командой <**F7 Seismic**>, которая доступна в режиме <**F4 Source**>, и задать магнитуду землетрясения, тогда размеры, ориентация и амплитуда в очаге будут вычислены автоматически, на основе эмпирических формул А.А. Поплавского [1997]. Необходимо обратить внимание на прогнозируемый период волны, который будет получен в результате применения эмпирических формул (*указывается в первой строке меню*), так как он может оказаться слишком малым для удовлетворения аппроксимационных критериев.

Если период мал, то его следует увеличить искусственно. При моделировании цунами, подходящего к побережью Сахалина или Курильским островам, этот период можно выбрать приблизительно, в зависимости от местоположения очага цунами (по историческим данным):

- 30-40 мин для источников на другом берегу Тихого океана;
- 10-12 мин в районе Курило-Камчатского глубоководного желоба;
- 4-6 мин. для источников цунами в Японском море.

В том случае, если источник цунами выходит за пределы расчетной области, то волну цунами можно задать с помощью периода

во времени и направления подхода ее к свободной границе расчетной области. Определение такой волны выполняется с помощью меню **<F3 Period>**, в котором необходимо заполнить ячейки с периодом волны, амплитудой и направлением ее подхода. Такая волна будет проникать в расчетную область через свободные границы, и этот процесс будет начат сразу же после запуска вычислительного эксперимента. Последнее означает только то, что при указании времени для физического процесса, необходимо делать поправку на время подхода волны к расчетной области.

До запуска расчетов желательно проверить согласование аппроксимационных критериев для заданного минимального периода волны цунами. С этой целью необходимо вызвать меню **<F2 Service>**, в трех окнах нижней строки которого реализован специализированный калькулятор. Необходимо выбранный период волны (*в минутах*) внести в окно “***Time***”, затем перейти в окно “***Depth***” и нажать на “ввод”. В окне “***Depth***” появится минимально допустимая глубина моря, до которой возможно моделирование волны цунами. Повторив команду **<F2 ReDraw>**, можно увидеть величину области отсечения на мелководье. Если эта область слишком велика, то можно попытаться уменьшить количество точек аппроксимирующих полуволну в среднем окне “***Cells***” до 4-х, и снова уточнить минимально допустимую глубину. Если этого мало, то необходимо вручную выставить минимальную глубину и количество аппроксимирующих ячеек, затем получить решение о минимальном периоде волны для данной батиметрической карты. Затем следует выставить период волны в источнике цунами в соответствии с периодом, минимально допустимым по аппроксимационным критериям.

Запуск процесса моделирования волны цунами производится по команде **<F9 Start>**. При первом запуске на экране появляется окно запроса на общее имя файлов протокола и мореографных данных, в

этом же окне необходимо скорректировать физическое время начала вычислительного эксперимента и дискретность записи мореографических рядов. Вычислительный эксперимент может быть остановлен по нажатию одной из клавиш на клавиатуре, для продолжения расчетов необходимо снова дать команду **<F9 Start>**, которая уже не будет сопровождаться дополнительными запросами.

По мере подхода волн цунами к мариографным постам наблюдения, на них будут появляться: сначала записи о времени регистрации первого изменения уровня; затем будут изображены столбики и надписи с экстремальными значениями уровня моря и временем его регистрации.

Если необходимо произвести уточненный расчет вблизи конкретного пункта на побережье, то можно воспользоваться методом “переката”, то есть замены одной батиметрии на более подробную, непосредственно в процессе вычислений. Для этого необходимо приостановить расчеты и вызвать редактор батиметрических карт по команде **<F6 Chart>**. В редакторе может быть назначена переинтерполяция текущей матрицы с целью уменьшения шага сетки, с соответствующим уменьшением размеров расчетной области, или по команде **<F3 Read>** может быть прочитана другая батиметрическая карта. После выхода из редактора будет интерполирована не только матрица батиметрии, но и все расчетные гидродинамические поля. До запуска вычислений на новой карте, желательно снова обратиться к меню **<F2 Service>**, где необходимо сделать повторное уточнение и установку минимальной глубины моря в соответствии с аппроксимационными критериями.

В программе **ANI** предусмотрена только временная блокировка файлов протокола и мариографных данных, которая делается только на моменты их обновления, обусловленные дискретностью записываемых временных рядов. Это означает, что текущие результаты вы-

числений могут быть просмотрены с другого компьютера, имеющего доступ к файлам результатов через локальную сеть. При этом текущие файлы результатов могут быть удалены или переименованы, программа ANI это обнаружит и оформит их заново, начиная с текущего момента времени.

Если в меню *<F2 Service>* установлен режим записи контрольных точек “*CheckPoint*”, то на другом сетевом компьютере может быть продублирован расчет, что может потребоваться для уточненного моделирования в нескольких береговых пунктах одновременно.

На первом этапе моделирования цунами, которое должно выполняться в оперативном режиме, требуется наискорейшее вычисление амплитуды и времени подхода максимальной волны цунами. Эта информация непрерывно показывается и обновляется на графическом экране ЭВМ. По трехмерному изображению волнового поля, которое тоже периодически обновляется на экране, можно сделать оценку времени угасания волнения, вызванного цунами, что требуется для принятия решения о прекращении тревоги цунами.

Основные результаты моделирования цунами, а также все характеристики расчетной области и параметры генерируемых волн записываются в виде текстового протокола, с помощью которого возможно точное воспроизведение всего вычислительного эксперимента.

Моделирование приливного режима

Моделирование приливных колебаний в Охотском море основывается на использовании приливных гармонических постоянных в качестве исходных данных для генерации волновых движений в окрестности метеографных постов, на которых эти гармоники измерялись.

Для моделирования приливного режима необходимо перестроить параметры математической модели, для этого вызывается меню *<F2 Service>* и устанавливается режим учета вращения Земли “*Cori-*

olis Forces“, добавляется учет вязкости “*Friction = 0.0025*“ (с учетом схемной вязкости на батиметрии Охотского моря с шагом сетки 6 угловых минут, в расчете необходима добавочная вязкость величиной всего лишь порядка 0.0013). При моделировании столь длительных во времени процессов, как приливные колебания, встает вопрос уже не о соблюдении аппроксимационных критериев, а об обеспечении аппроксимационной точности. Это означает увеличение количества аппроксимирующих волну ячеек до 24÷30 вместо 6÷4, использованных ранее для моделирования цунами.

Приливные гармоники и координаты мариографных постов хранятся в файле ANI.tim, который автоматически открывается из меню <*F3 Time*>, при обращении к окну “*Tide\Wave*“ в первое строке этого меню. При последующих вызовах “*Tide\Wave*“ будет предложено выбрать другой файл с приливными гармониками, по маске “*.tim”. Когда на экране изображен список приливных станций, то пробелом можно исключить некоторые из них из процесса генерации приливных волн, исключенные станции помечаются знаком “#”.

Если выйти из списка по команде <*Escape*>, то все доступные приливные станции будут работать в качестве генераторов приливных волн. Если же из списка выйти по команде <*Enter*>, то приливные гармоники той станции, на которую указывает курсор, будут использованы в качестве генератора приливных волн входящих через свободные границы. Первый вариант: <*Escape*> - может быть использован для восстановления приливного режима в больших полузакрытых областях, когда в восстановлении приливного поля задействуется весь комплекс наблюдений на открытых границах расчетной области. Второй вариант: <*Enter*> - может быть использован при восстановлении приливного поля в малых расчетных областях или при исследовании вынужденных колебаний от простых источников.

Запуск процесса вычислений производится по команде **<F9 Start>**, за которой следует более сложный запрос, где кроме имен файлов, времени начала и дискретности записи мариограмм, может быть сделан запрос на уточнение физического времени начала вычислений. Последнее учитывает тот факт, что запуск приливной волны делается с момента смены знака амплитуды приливной волны (*когда волна имеет нулевую амплитуду*). При моделировании приливного режима в Охотском море, процесс установления приливных колебаний длился около одной недели физического времени, качественные результаты по амплитудам и фазам приливных волн были получены примерно через один месяц вычислительного процесса.

Моделирование приливного режима может быть приостановлено на контрольной точке, при этом в файл рестарта будут записаны все данные, необходимые для восстановления вычислительного процесса, в том числе данные по батиметрии, постам наблюдения и приливным станциям. То есть для продолжения расчетов достаточно одного файла рестарта: “**FileName.chk**”.

Алгоритмы расчетов прилива еще не доведены до уровня, достаточного для включения в режим непрерывного моделирования, по некоторым причинам:

1 - еще не было выполнено ни одного расчета, где количество приливных станций было бы достаточным для перекрытия всех Курильских проливов; не отрабатывались эмпирические параметры связанные с величиной и изменчивостью придонного трения и искусственной вязкости, присутствующей в разностных аппроксимациях гидродинамических уравнений;

2 - не корректировалась топография морского дна вблизи от приливных станций, что необходимо делать для согласования фазовых характеристик приливных волн проходящих по реальному морю и по сеточной расчетной области;

3 - в программе реализованы законы управления уровнем моря вблизи точек генерации приливной волны, которые слишком жестко отслеживается абсолютный уровень моря, это будет мешать совместному моделированию приливов со штормовыми нагонами и цунами.

Это те вопросы, которые нуждаются в доработке, при этом первые два из них могут быть решены только при помощи или участии Сахалинского УГМС.

Прохождение атмосферного циклона и прогноз штормовых нагонов

Реализация алгоритмов моделирующих взаимодействие атмосферы и

океана, изначально была ориентирована на использование реальных полей атмосферного давления и ветра. В настоящей же версии программы используется упрощенное представление атмосферного циклона, который на поверхности воды имеет форму окружности, внутри которой задано вихревое распределение скорости ветра с небольшим спиральным закручиванием к центру циклона.

Моделирование циклона производится в программе **<F6 Simulation>**, где для задания траектории и параметров циклона предусмотрена процедура **<F5 Meteo>**. На графическом экране ЭВМ циклон изображается в виде окружности, с осью ориентированной по меридиану. Если внутри циклона задается перепад давления или определяется скорость ветра, то внутри окружности появляются кривые линии, показывающие функции распределения этих полей.

Все параметры циклона могут быть определены в меню, которое вызывается по команде **<Enter>**. Позиционирование циклона может быть выполнено, также, с помощью стрелок на клавиатуре. Фиксация контрольной точки на траектории выполняется по **<Insert>**.

Команда **<Space>** - пробел, связывает подвижную отметку с ближайшей контрольной точкой на траектории циклона, такую же

привязку можно сделать с помощью <+> и <->, где контрольные точки будут перебираться по списку. Если подвижная отметка связана с контрольной точкой, то ее можно удалить с помощью <*Delete*>, или передвинуть на новое место, для этого необходимо перемещать отметку удерживая нажатой клавишу <*Shift*>.

Моделирование циклона можно выполнять по тем же правилам что и цунами, но учитывая что циклон обычно покрывает большие расчетные области, необходимо ввести учет сферичности и вращения Земли, а также подобрать коэффициенты придонного трения.

Регламент вычислений для уточненного прогноза цунами.

Учитывая, доступность эффективной вычислительной техники, предлагается организационно-техническое совершенствованию службы цунами с целью введения в регламент ее действий в тревожном режиме экспертно-прогностических работ с использованием комплекса гидродинамических вычислительных экспериментов.

Схема проведения вычислительного эксперимента, в котором задействованы все средства контроля аппроксимационных критериев, может быть представлена в виде нескольких этапов:

1. Первый этап подготовительный. Суть его состоит в подготовке комплектов батиметрических карт для каждого из защищаемых участков побережья, на которых должна быть произведена обкатка всех возможных источников цунами, и на основании этих работ составляется регламент проведения вычислений в тревожном режиме. Если защищаемые берега распадаются на группы, то в соответствии с количеством этих групп должно быть подготовлено такое же количество процессоров (компьютеров), объединенных в локальную сеть, для совместного решения задачи предупреждения всех пунктов одновременно. В процессе выполнения этого этапа должны быть

также проведены тренировки дежурного персонала по использованию вышеупомянутого регламента в различных конкретных случаях.

2. При объявлении о цунамигенном сейсмическом событии, выбирается генеральная карта батиметрии, из условия покрытия всей области очага землетрясения с включением больших участков подробных карт второго уровня, по которым проходят маршруты волн цунами, в направлении защищаемых пунктов. Как правило, вся близ береговая зона, до глубины 200-500 метров, на этом этапе отсекается во избежание появления осцилляций в зонах нарушения критериев пространственной аппроксимации. Вычисления ведутся до тех пор, пока фронт волны цунами не достигнет зоны отсечения в том районе, по которому проходят основной поток энергии в направлении защищаемых пунктов. По достижении этой границы решение приостанавливается, и в случае, если моделирование ведется для группы защищаемых пунктов, то записывается образ программы из памяти ЭВМ, который может быть использован как для продолжения расчетов на другом компьютере, так и для повторения моделирования, с записанной “контрольной точки”, для участков побережья отложенных во вторую очередь.

3. На основном (первом) компьютере производится смена батиметрии на более подробную, у которой линия отсечения проходит ближе к защищаемому побережью. Для запуска параллельных расчетов на других компьютерах, на них выполняется рестарт с контрольной точки, записанной ведущим компьютером, затем, либо сразу же производится смена батиметрии, либо продолжается прерванный расчет для доведения волны цунами до другой зоны отсечения на маршруте распространения волн цунами.

4. Описанный процесс размножения решений для разных регионов может повторяться многократно и асинхронно для всех процессоров включенных в работу. Завершение переходов с карты на карту

должно происходить либо в том случае, когда аппроксимационное ограничение глубины уменьшается до 1-2 метров, либо когда волна входит в замкнутые акватории, в которых существенное влияние оказывает переотражение волн от оконтуривающих эту область границ. К примеру если волна входит в замкнутый со всех сторон Южно-Курильский пролив, то необходимо оставить расчеты волнения в нем на длительный срок для оценки времени воздействия волны цунами на побережье, которое в данном случае оценивается сроком не менее 10-ти часов, а максимальная волна в Южно-Курильске может проявится через 2-4 часа после фронта первого вступления цунами. При этом ничто не мешает дождаться пока волна дойдет до линии отсечения в районе Южно-Курильска и произвести для него уточненный расчет непосредственно до самой кромки побережья.

5. Возможно осуществление перехода с подробной карты на укрупненную, что необходимо делать, к примеру, если землетрясение происходит у япономорских берегов Японии, тогда для точного описания очага цунами необходимо воспользоваться уточненной картой, на которой происходит генерация волны цунами и осуществляется моделирование отражения этой волны от побережья Японии. Так как расстояние от Японии до Приморья не может быть покрыто единой мелкосеточной картой, что было бы и неразумно ввиду многократного увеличения времени вычислений, то в данном случае можно воспользоваться переносом решения на загруженную генеральную карту, по которой волна цунами доводится до зоны отсечения вблизи Приморья и Сахалина, затем снова осуществляется переход на более подробную карту для моделирования воздействия цунами на Российском побережье, с учетом основной волны цунами и ее отраженной от побережья Японии составляющей.

Глава 4. Реализация длинноволновых вычислительных экспериментов для морских инженерных изысканий и оперативного контроля морских акваторий

Реализация и внедрение гидродинамических вычислительных экспериментов является актуальной и приоритетной задачей информационно-аналитического обеспечения мониторинга и контроля опасных морских явлений на Дальнем Востоке России. Для эффективного воздействия этого инструментария вполне достаточно существующих потоков оперативных данных, проходящих в рамках регламентов повседневной работы Сахалинского Управления гидрометеослужбы и Геофизической службы Российской академии наук.

В настоящее время в лаборатории вычислительной гидромеханики и океанографии ведутся активные исследования гидродинамических моделей на основе длинных волн в полных потоках. Эта модель предназначена для решения большого комплекса задач моделирования приливного режима, штормовых нагонов, цунами и других опасных морских явлений. В случае применения такого моделирования для решения практических задач оперативного мониторинга состояния моря круг задач может быть существенно расширен, в зависимости от оперативности поступления и качества данных от измерительных систем и постов наблюдения.

4.1. Оценка штормовой гидродинамики шельфа Курильских островов

Южно-Курильский пролив является граничной акваторией Охотского моря, сложность рельефа дна которого не позволяет формализовать предварительные расчеты в виде обобщенных номограмм, но, учитывая, что на современных компьютерах кинематиче-

ские расчеты выполняются очень быстро, оперативное использование соответствующих кинематических моделей может обеспечить более глубокий экспертный анализ и прогноз опасных морских наводнений.

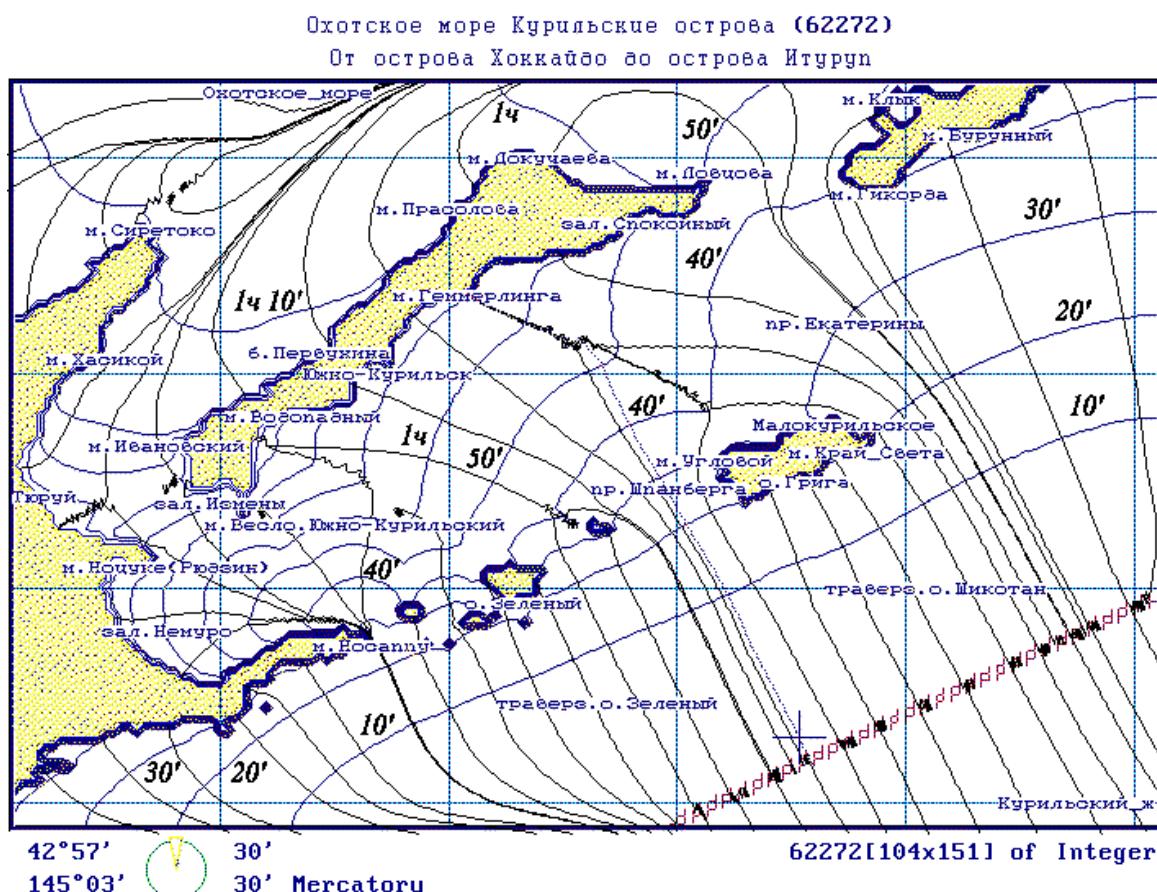


Рис. 4.1. Ортогональная сетка длинноволновых фронтов и лучей, построенная относительно прямой линии вытянутой вдоль Курило-Камчатского желоба. Рисунок показывает направление и изменение интенсивности длинноволновых откликов вблизи южных Курильских островов на гидродинамические процессы в Тихом океане. Сетка изохрон построена с интервалом 10 минут, лучи показывают характерную концентрацию/рассеяние волновой энергии вблизи побережья.

Наиболее наглядное представление результатов такого моделирования оформляется в виде карт с линиями изохрон (рис. 4.1), фиксирующих положение волновых фронтов через равные интервалы времени, перпендикулярно к которым строятся линии лучей – направлений распространения волновой энергии. Там где на криволинейной сетке наблюдается сходимость лучей и обратная кривизна

волновых фронтов, следует ожидать существенного усиления первого вступления волн штормовых нагонов и цунами. В регионах, где изохроны учащаются (проходят существенно ближе одна от другой), следует ожидать усиление собственных колебаний, период которых можно оценить суммированием интервалов между изохронами.

Из рисунка следует, что город Южно-Курильск расположен между двумя узловыми линиями (рис.4.1), концентрирующими волновую энергию фронта первого вступления цунами на юге, - в районе мыса Водопадный и на севере, - в районе мыса Геммерлинга. Это означает, что в случае штормовых возмущений уровня моря со стороны Тихого океана (тихоокеанских цунами - в том числе) Южно-Курильск может иметь предвестники в виде волн не очень высокой амплитуды, которые позволяют с высокой степенью достоверности оценить опасность морских наводнений при подходе последующих волн, аккумулирующих энергию в диапазоне собственных частот акватории Южно-Курильского пролива.

Гидродинамическая активность шельфа Южных Курильских островов проявляется в виде аккорда собственных периодов длинноволновых колебаний в 2, 3 и 4 часа. Высокая добротность Южно-Курильского пролива, как длинноволнового осциллятора объясняет частые проявления морских наводнений. По этой же причине в Южно-Курильском проливе происходят длительные во времени колебания уровня моря, инициированные как штормовыми воздействиями, так и короткими единичными импульсами цунами.

По результатам численного моделирования циклона 30 сентября 1994 (рис. 4.2) можно сделать оценку длинноволнового отклика в различных береговых пунктах. Атмосферные циклоны обязательно возбуждают собственные длинноволновые колебания уровня моря именно в мелководных прибрежных акваториях, интенсивность ко-

торых наиболее сильно проявляется на частотах, близких к аккордам собственных колебаний данного участка прибрежного шельфа.

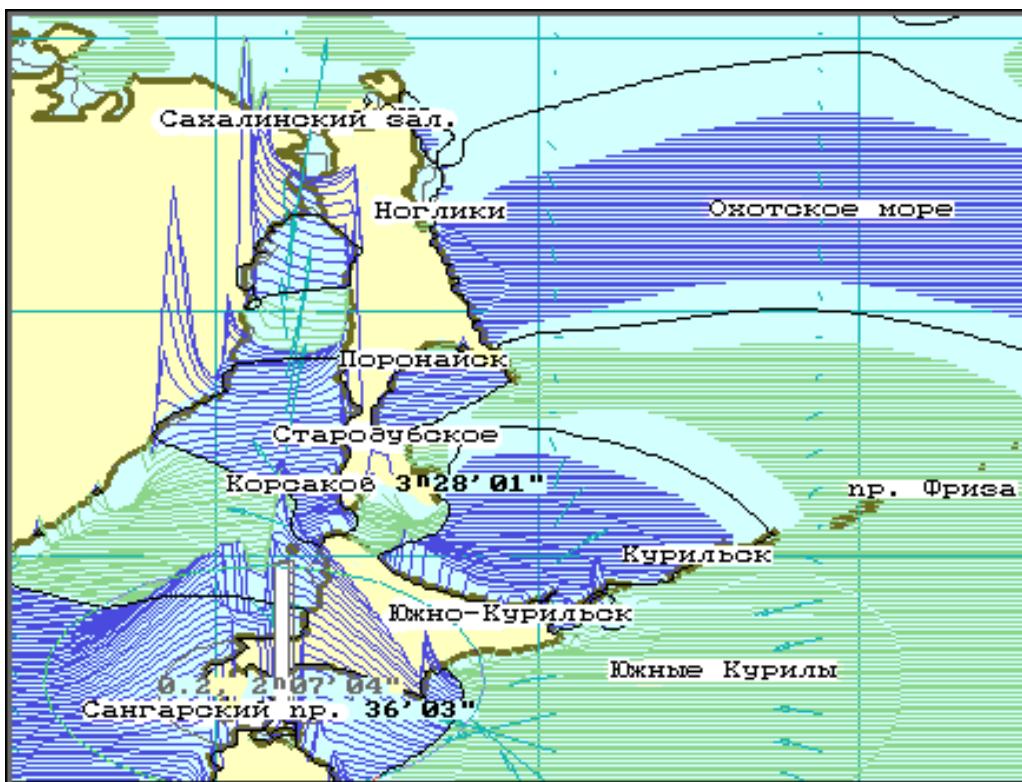


Рис. 4.2. Характерное изменение уровня моря и проявление сейшевых колебаний вблизи побережья под воздействием циклона, прошедшего над Южными Курилами 30 сентября, за 5 дней до землетрясения, и цунами 4 октября 1994 года. Величина экстремальных уровней моря в расчетной области пока не превышает 30 см, наблюдаемых на приморском побережье Татарского пролива.

Вычислительные эксперименты подтверждают, что акватория Южных Курильских островов должна быть отнесена к районам наибольшей повторяемости опасных морских наводнений. Повышенная концентрация длинноволновой энергии на ограниченной акватории должна иметь следствием повышенную изменчивость нагрузки на морское дно, что в свою очередь может привести к повышенной сейсмической активности всего региона. Данное предположение может быть проверено с помощью информации, встроенной в вычислительные эксперименты в виде компьютерных каталогов событий цунами и в виде архивов цифровых метеографических записей приливов, штормовых нагонов и цунами.

Необходимо также отметить, что непосредственная близость к Южным Курилам глубоководной Курильской котловины обеспечивает быстрое распространение длинноволновой энергии на всю акваторию Охотского моря, что и было отмечено добавочными длинноволновыми колебаниями на метеографах в поселках Курильске и Стародубском.

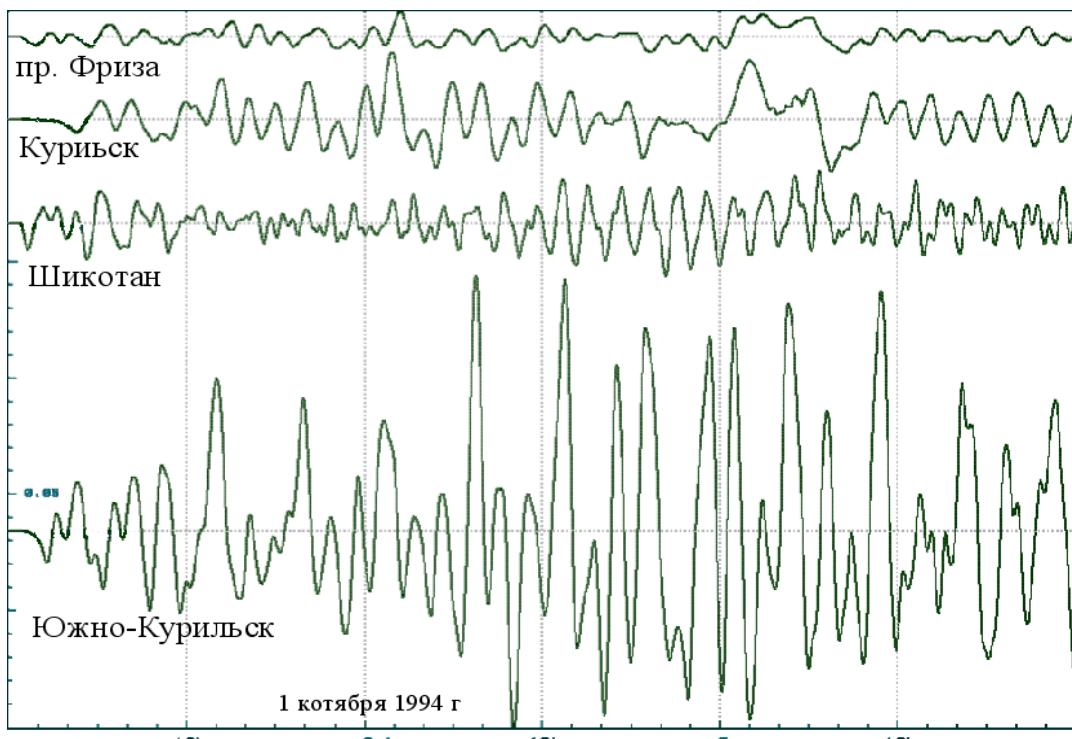


Рис. 4.3. Результат численного моделирования атмосферного циклона 30 сентября 1994 года (сверху вниз) в проливе Фриза, вблизи Курильска, острова Шикотан и на шельфе вблизи Южно-Курильска. На левой границе рисунка показана шкала амплитуд с отметками через 5 см.

Рис. 4.3 еще раз иллюстрирует существенное усиление длинноволновых процессов на Южно-Курильском шельфе.

Последний вывод не имеет безусловного характера, но поиск связи между такими событиями могут быть значимыми для быстрой оценки опасности морских наводнений на побережье вблизи мелководного шельфа, которая может быть сделана по результатам наблюдения слабых колебаний на удаленных метеографах Курильских островов. Подобные предположения могут быть проверены с помощью информации, встроенной в вычислительные эксперименты

в виде компьютерных каталогов событий цунами и в виде архивов цифровых метеографических записей приливов, штормовых нагонов и цунами.

Оперативное моделирование развития шикотанского цунами 5 октября 1994 г.

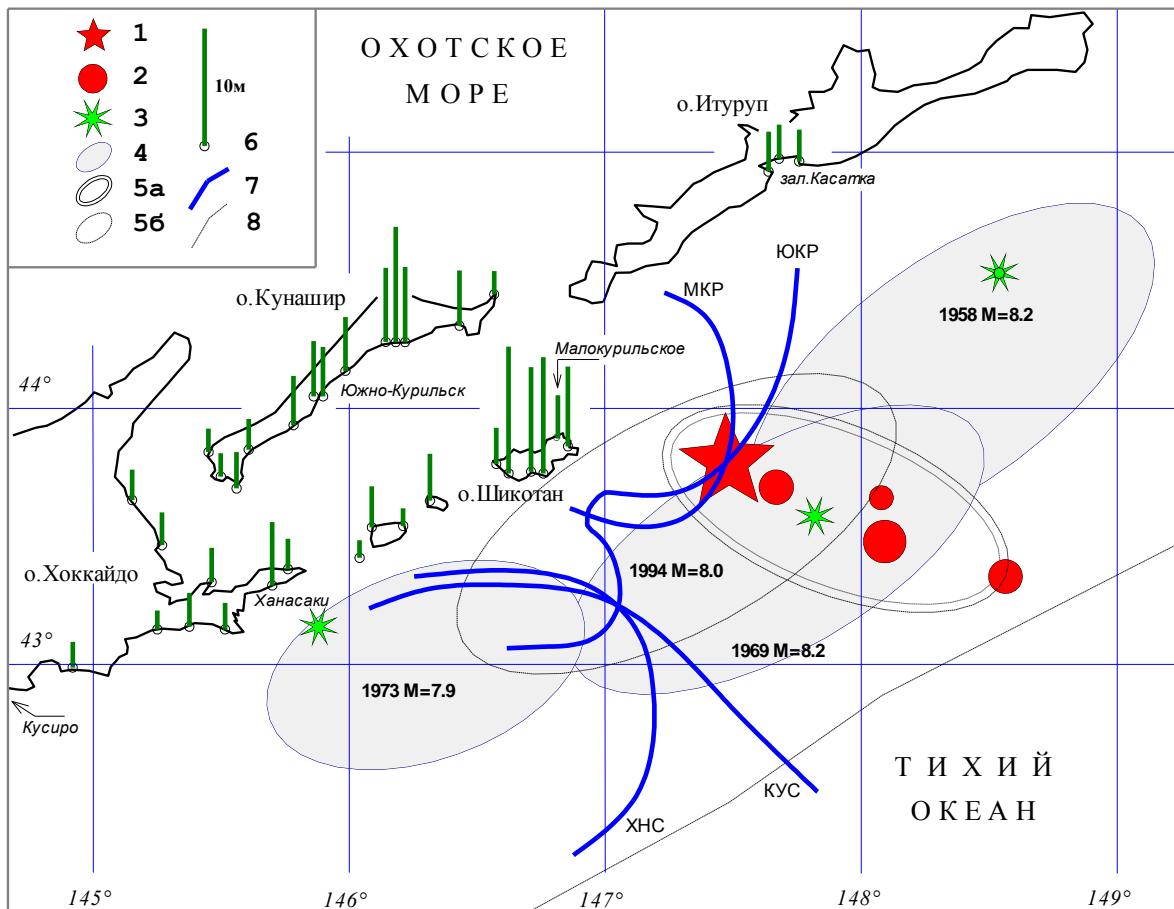


Рис. 4.4. Обзорная схема Шикотанского цунами 5.Х.1994г. и максимальные наблюденные высоты цунами на побережье (по результатам полевого обследования): 1-3 - эпицентры: 1- главного толчка; 2 - афтершоков с $M \geq 6,8$ в первые 6 ч после главного толчка; 3 - сильнейших исторических землетрясений (указаны год и магнитуда землетрясения); 4-5 - контуры очагов цунами: 4 - сильнейших исторических цунами; 5а - цунами 5.Х.1994г., по сильнейшим афтершокам за первые 6 ч; 5б - то же, по области афтершоков первой недели; 6 - пункты на побережье и максимальные наблюденные в них высоты цунами; 7 - обратные изохроны добегания цунами, построенные от пунктов на побережье; 8 - ось глубоководного желоба [Иващенко и др, 1996].

Шикотанское цунами 5 октября 1994 г относится к наиболее значительным событиям на Курильских островах за последние годы.

Его описание можно найти в [Иващенко и др., 1996], куда включен в сокращенном виде и материал настоящего раздела, включая рисунки. На рисунке 5 приведена обзорная схема этого события.

Самая первая попытка моделирования цунами производилась непосредственно в сахалинском Центре цунами, утром 5 октября 1994 года. Вычислительные ресурсы компьютера стоящего на дежурстве (PC-386/25), в соответствии с аппроксимационными критериями, позволяли проводить волну по Южно-Курильскому проливу с периодом не менее 12 минут. Расчетная область выбиралась исходя из скорости вычислений на данном компьютере, и размер ее был таким, что очаг землетрясения оказывался вне этой области. Тогда в качестве источника была выбрана одиночная волна с периодом 12 минут, входящая в Южно-Курильский пролив с юго-востока.

По результатам расчетов был определен характер распределения амплитуд цунами по Южным Курильским островам, где коэффициент усиления амплитуды цунами был оперативно скорректирован по сообщению с судовой радиостанции о высоте цунами в Малокурильской бухте, равной двум метрам. На основании вычислительного эксперимента было определена групповая структура волновых пакетов, которые проявлялись максимальными заплесками на побережье островов Южно-Курильского пролива с периодичностью приблизительно равной двум часам. Тревога цунами была отменена в 8ч 45м сахалинского времени, а по результатам расчетов последняя крупная волна цунами проходила около Южно-Курильска в 9 часов утра, что, в частности, отмечалось в процессе оперативных переговоров с наблюдателями в Южно-Курильске (в протоколах ведения тревоги цунами, такая отметка отсутствует).

В последующем, по мере накопления материалов о землетрясении и цунами на Южных Курилах, была произведена новая серия вычислительных экспериментов, с использованием более мощного

компьютера: IBM-PC 486/66. В первую очередь был произведен расчет обратных изохрон от Кусиро, Ханасаки, Малокурильска и Южно-Курильска, которые с двух сторон касаются очага цунами. К сожалению мы не имеем достоверных данных о характеристиках волны цунами с островов расположенных к северу от очага землетрясения. Известны только экспедиционные измерения заплесков в бухте Касатка, где мариограф не работает с 1983 года, а в Северо-Курильске цунами не превышает уровня волн зыби и не может быть надежно выделено по записи на мариографе.

Наиболее показательными являются три варианта численного моделирования цунами 5 октября 1994 года, которые были сделаны до получения данных об экспедиционных наблюдениях на Курильских островах.

1 *Оперативный* очаг цунами строился по эмпирическим формулам А. А. Поплавского [1997], которые предназначены для оперативного использования в службе предупреждения о цунами. В данном случае в качестве исходных данных используется только магнитуда землетрясения 7.9 и координаты очага. Очаг строится в виде эллиптического поднятия уровня воды с амплитудой 2.7 м. и размерами осей 130x40 км. Ориентация задается с помощью направления малой полуоси, в соответствии с усредненным градиентом наклона дна под очагом, в сторону уменьшения глубины.

2 “*Сахалинский*” очаг цунами строился в соответствии с координатами афтершоков землетрясения, полученными на Южно-Сахалинской сейсмостанции. В данном случае используется разлом длиной 160 км., ориентированный поперек Курильского глубоководного желоба, при этом к северу происходит подъем уровня на полтора метра, а к югу такое же опускание. В источнике цунами задается начальное поле скоростей в направлении опускания дна. Раз-

меры очага задаются исходя из требования численной аппроксимации, так чтобы период волны цунами был не менее 8 минут.

З “**Японский**” очаг цунами был получен по FAX-у из Японии от Shuto N. (Tohoku University). Его размеры приблизительно 160 км вдоль желоба, где тихоокеанская сторона поднимается на 1.8 м., а остров Шикотан опускается на 70 см. При этом необходимо отметить, что японские измерения координат землетрясения сильно отличаются от сахалинских, а также от координат полученных из американских источников.

Таблица 4.1. Результаты расчетов по основным географическим пунктам

Название	Глубина	Варианты расчета			Реальные наблюдения
		1	2	3	
Малокурильское	19	3.3/-2.5	4.3/-4.2	3.4/-5.3	2.7,2.9-3.7
Южно-Курильск	11	1.6/-2.4	2.7/-2.3	3.0/-1.9	4.7,4.2
М. Рикорда	8	3.3/-3.0	2.0/-2.4	2.4/-3.0	-
М. Ловцова	8	2.4/-3.8	1.9/-1.7	1.9/-2.3	2.0
Б. Церковная	11	0.6/-1.2 ^{*)}	6.2/-3.3	6.2/-4.7	6.0-8.9, 16.6?
О. Зеленый	16	0.7/-1.7 ^{*)}	3.6/-2.4	3.7/-2.2	1.5,3.5
Ханасаки	8	0.4/-1.1 ^{*)}	3.1/-2.8	2.2/-1.4	3.4

Первый вариант расчета имел период волны цунами в источнике приблизительно 3.5 минуты, что недопустимо по аппроксимационным критериям. Для удовлетворения этих критериев, через двадцать минут расчетного времени в Южно-Курильском проливе была произведена смена расчетной карты на более подробную. В это время волна цунами только еще подходила к острову Шикотан, и столь ранняя смена карты привела к потере достаточно большой части волновой энергии цунами, что привело к занижению амплитуд на всех Тихоокеанских мариографных точках (соответствующие значения помечены в таблице 4.1 звездочкой).

Второй вариант очага цунами наилучшим образом согласуются с наблюдениями цунами на побережье. Только в этом случае получается достаточно слабое цунами в бухте Касатка, и сильное цунами

на тихоокеанском побережье Хоккайдо, как это и наблюдалось в действительности.

Вариант с японскими данными, где очаг расположен вдоль Курильского желоба, дает волну цунами которая, должна существенно сильнее проявится на островах Кунашир, Итуруп и Зеленом, и не должен был образовывать сильного всплеска в сторону Тихоокеанского побережья Хоккайдо.

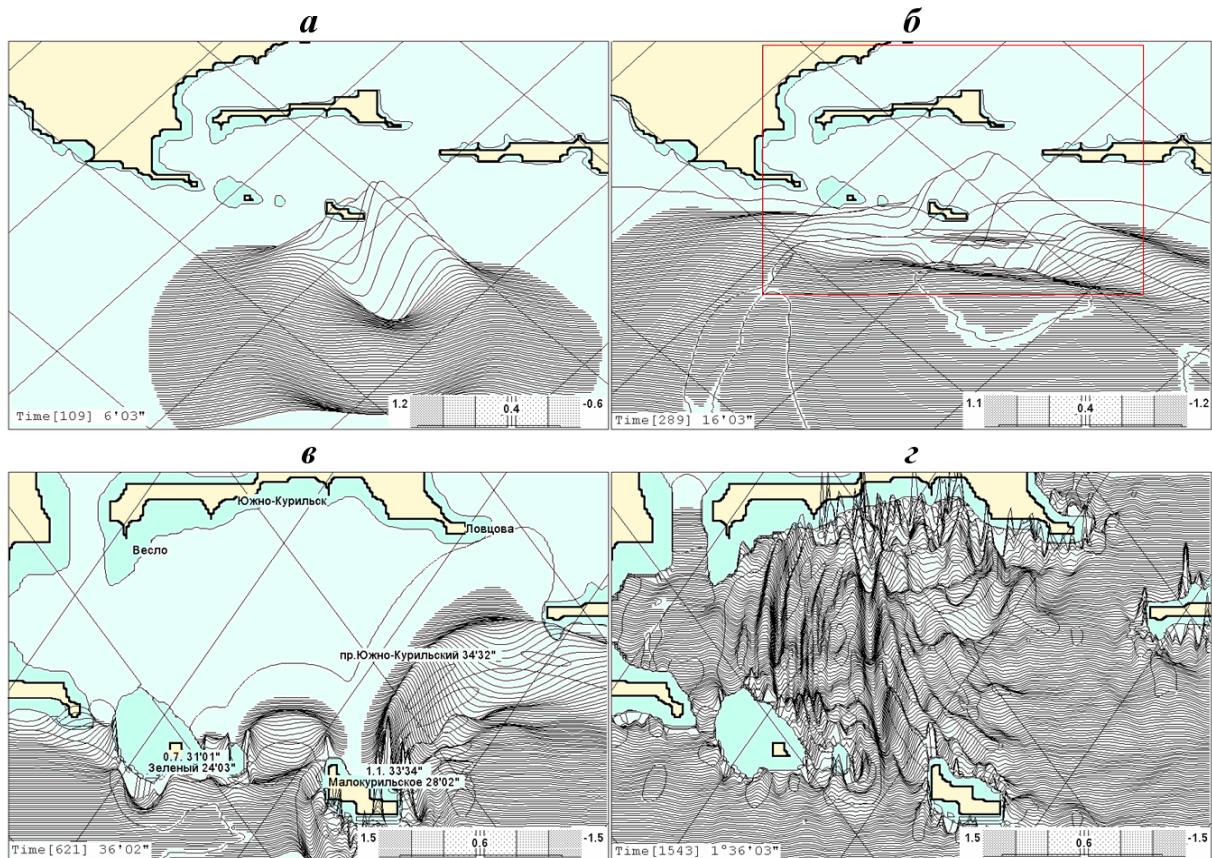


Рис. 4.5. Результаты численного моделирования Шикотанского цунами 5/X 1994 в районе Южных Курил. а - форма очага возмущения уровня океана через 6 мин после землетрясения, максимальное возвышение в источнике 1,7 м; б - переход с обзорной расчетной батиметрии с шагом 1,8 км на более подробную (1км); в - прохождение первой волны цунами в Южно-Курильский пролив; [Иващенко и др., 1996 г.]. г - образование групповой структуры волн цунами и запирание волновой энергии в мелководном Южно-Курильском проливе.

По результатам уточненного моделирования цунами с помощью более точного задания очага, и после сравнения с результатами экспедиционных измерений и записями метеографов, оперативное чис-

ленное моделирование 5 октября 1994 года можно признать вполне удовлетворительным и чрезвычайно полезным для использования в оперативной службе предупреждения о цунами, и особенно для экспертизы воздействия цунами на побережье, которая должна выполняться непосредственно в процессе проведения тревоги. Выявленные недостатки, связанные с занижением амплитуды цунами на границах расчетной области, могут быть легко устранены путем увеличения вычислительной мощности дежурных компьютеров, что было показано последующим моделированием по уточненным очагам.

Еще раз хочется отметить, что неточности в определении положения эпицентра землетрясения могут устраниться, а результаты оперативного численного моделирования будут существенно уточняться, по мере поступления оперативных данных о прохождении реального цунами на побережье.

На Рис. 4.14 показаны формы возмущенной поверхности океана в различные моменты времени, на расчетных картах с различным масштабом и шагом сетки, иллюстрирующие ход вычислительного эксперимента по моделированию Шикотанского цунами 5.10.94г. Под каждым рисунком указаны координаты левого нижнего угла сетки, вид картографической проекции, время с момента начала землетрясения (ч,м,с) и градации по высотам уровня, которые служат масштабной шкалой.

4.2. Моделировании приливного режима

Охотское море является уникальным регионом для полноценного исследования численных алгоритмов моделирующих приливной режим и режим течений.

Положительным фактором для Охотского моря является его замкнутость и изученность приливного режима во многих пунктах его побережья [Таблицы приливов, 1960], что позволяет проводить ка-

чественную проверку численных моделей, граничных условий и методов генерации волновых колебаний уровня и течений.

К особенностям Охотского моря следует отнести также большие по площади мелководные акватории Пенжинской губы и в районе Шантарских островов, что обуславливает зарождение длинноволновых колебаний уровня моря с периодом, близким к суточному, и с большими амплитудами приливных волн; в заливах Терпения и Анива, напротив, зарождаются ярко выраженные аккорды высокочастотных колебаний.

Алгоритм восстановления приливного поля реализован специально для использования в условиях оперативных служб, осуществляющих наблюдение за наводнениями и цунами. В условиях информационно-аналитического центра наблюдения за состоянием моря на одном из компьютеров необходимо выполнять непрерывное моделирование приливного режима для Охотского моря в целом. Тогда в случае получения из оперативных служб СахУГМС прогноза о траектории и интенсивности циклона или при поступлении данных о цунамигенном землетрясении, на сопряженном компьютере или непосредственно на метеопосту в морском порту или на СПБУ, можно продублировать моделирование для конкретной акватории сахалинского шельфа и по уже сбалансированному приливному полю поставить прогнозное моделирование для оценки опасности штормовых нагонов или волн цунами.

Такое моделирование может быть использовано при обработке экспедиционных измерений, для более точного разделения приливной и постоянной составляющих течения. Любопытно также рассмотрение задач о восстановлении поля скоростей течений. По видимому, в зоне мелководного шельфа реализованная задача будет давать корректные результаты, в глубоководных же регионах решение задачи о приливах в полных потоках дает только дополнитель-

ную (интегральную) информацию, которая может быть использована при обработке результатов экспедиционных измерений течения на различных горизонтах..

Выполненные в последнее время вычислительные эксперименты по изучению гидродинамического режима в Охотском море позволяют надеяться на успешную реализацию моделирования приливного режима в длинноволновом приближении, который может выполняться в реальном времени, показывая особенности приливных колебаний уровня моря и приливных течений в любой точке акватории, а при необходимости, на любой момент времени вблизи особо контролируемых участков охотоморского побережья.

Постановка задачи о выявлении резонирующих участков морского дна с помощью гидродинамических вычислительных экспериментов

1. Если на прибрежную акваторию, как на физический резонатор воздействует внешнее возмущение на строго определенной частоте, то колебания во всей акватории должны перейти на указанную частоту, при этом амплитуда и фаза гармонических колебаний в конкретных точках будет зависеть от пространственной геометрии и резонансных свойств близлежащих к этой точке участков морского дна.

2. Если на акваторию воздействовать коротким единичным импульсным источником, то возникнут свободные колебания, минимальный период которых будет определяться импульсным источником, а по причине дисперсионных свойств распространения гармонических колебаний в реальной среде (увеличения периода волн с течением времени), возникнет также возмущение на всех более низких частотах.

3. Исходя из физических свойств распространения гармонических колебаний в водной среде, учитывая, что в сложной морской акватории всегда присутствуют области со свойствами высокодобротных резонаторов, следует ожидать, что по прошествии некоторого времени все колебания в заданной акватории приобретут свойства полосового спектра, где каждый локальный участок акватории будет иметь характерный аккорд собственных колебаний, определяемый ее топологическими и резонансными свойствами. Любые другие длинноволновые колебания уровня моря, не нашедшие отклика у каких-либо участков побережья, должны неминуемо угаснуть

Вывод: В результате короткопериодного импульсного возмущения вся акватория получит гармонические колебания уровня в широком спектре частот ниже начального, а по прошествии некоторого времени в данной акватории останутся колебания только на тех частотах, для которых по геометрическим особенностям формы морского дна будут выявлены участки с повышенной добротностью к определенным длинноволновым колебаниям уровня моря.

Оценка собственных длинноволновых колебаний на акватории Охотского моря

Приливные колебания уровня моря по своей природе являются вынужденными: возникающими под воздействием астрономических сил, сил притяжения Луны и Солнца. Величина чистого геопотенциала соответствует суточному циклу изменения уровня моря величиной около 70 см (*при совместном действии светил*), которые в среднем и наблюдаются в открытом океане.

Величина волн в Охотском море достигают 12 метров на севере, в Пенжинской губе, и 8 метров на западе, в районе Шантарских островов. Очевидно, что превышение приливного уровня над величиной, обоснованной внешними силами, может быть объяснено

только резонансными свойствами прибрежных акваторий, в которых и происходит усиление или накопление длинноволновой энергии на близких астрономических – вынужденных и резонансных – собственных периодах волн.

Второй важный фактор, изучение которого ставилось целью при проведении вычислительного эксперимента, - феномен генерации высокочастотных, с периодом менее 12 часов, приливных волн. В природе, так же как и в вычислительном эксперименте, под воздействием вынужденных гармонических колебаний не могут проявляться высокочастотные гармоники, кроме как под воздействием нелинейных эффектов. В природе, к примеру, высокочастотные резонаторы могут возникнуть за счет вихреобразования в приливных течениях около береговых мысов или мелководных банок. В вычислительном эксперименте на основе длинноволновой модели вихревые эффекты не контролируются, что обусловлено открытой расчетной схемой со свойствами гиперболической системы дифференциальных уравнений. В этом случае высокочастотные резонаторы могут проявляться только как результат разрушения гладкости решения, например при несоблюдении аппроксимационных критериев на мелководье.

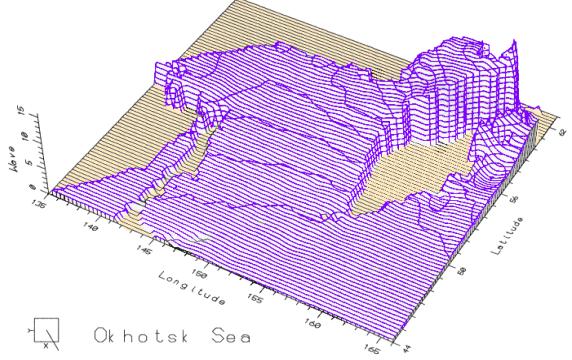
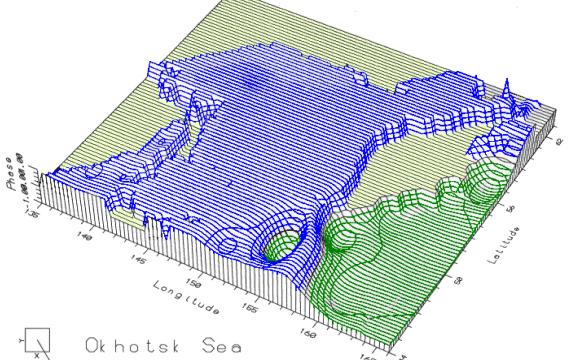
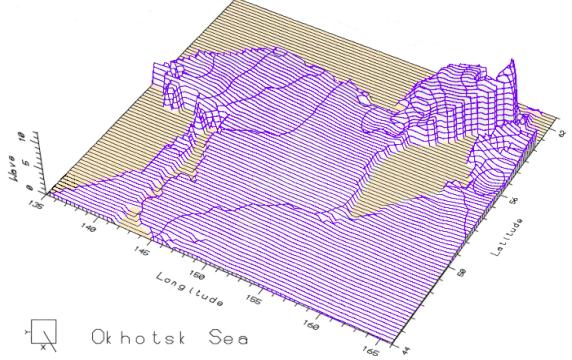
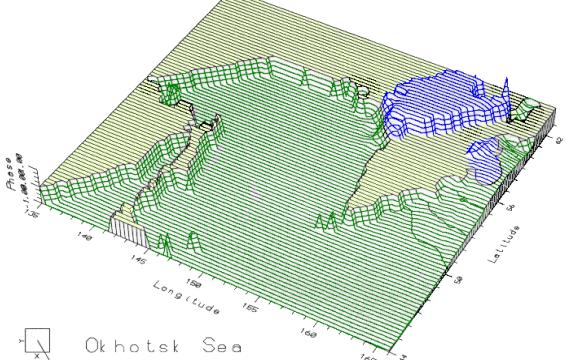
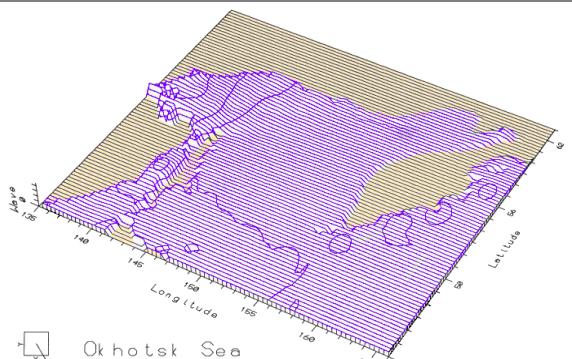
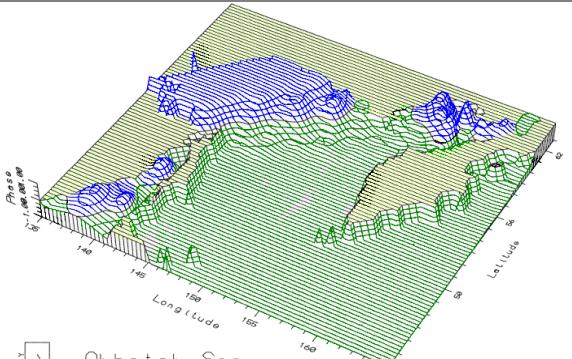
Теоретически можно показать [Белоцерковский, 1982], что аппроксимационные нарушения по физической сути своей аналогичны вязкости жидкости, где величина такой схемной вязкости линейно зависит от шага расчетной сетки. К сожалению, в настоящее время еще не разработано алгоритмов выполнения вычислительных экспериментов на неравномерных и нерегулярных сетках, поэтому в вычислительных экспериментах приходится просто минимизировать аппроксимационные погрешности, в результате чего при моделировании приливного режима в Охотском море восстановление высокочастотных гармоник вызывает трудности технического характера.

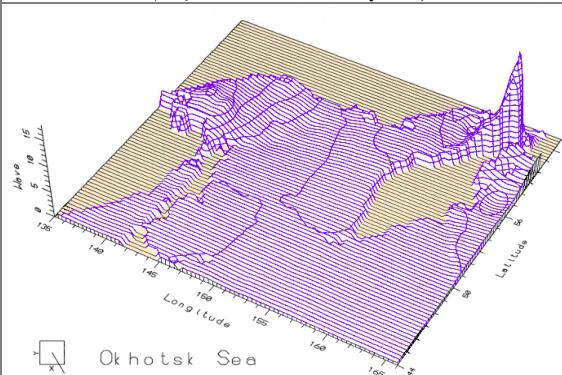
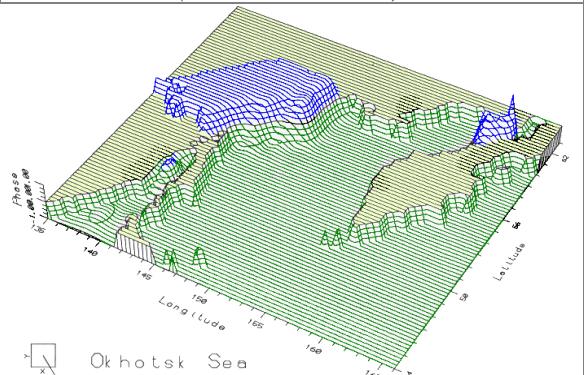
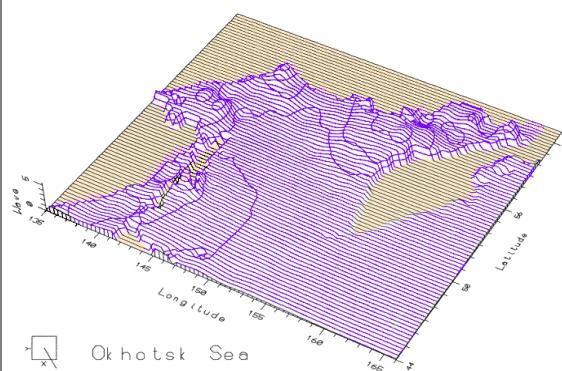
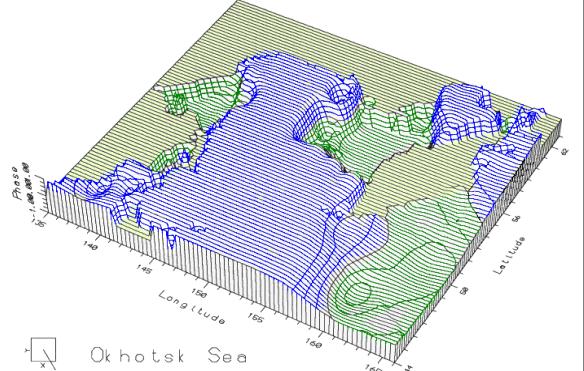
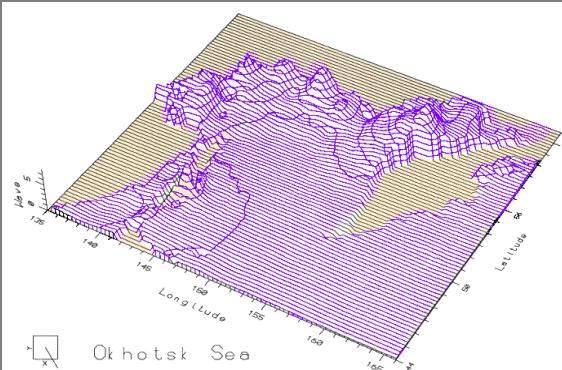
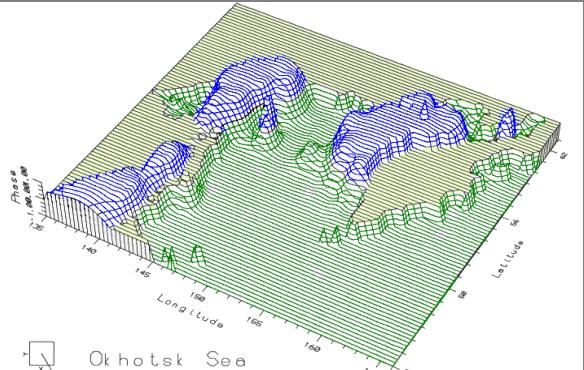
Из вышесказанного следует, что приливной режим Охотского моря в наибольшей степени определяется резонансными свойствами его мелководных шельфовых акваторий. Практически все приливные гармоники Охотского моря превышают величину, определяемую геопотенциалом, в шельфовых акваториях Охотского моря наблюдаются высокочастотные гармоники с периодами в 4 и 6 часов. Поэтому первым вычислительным экспериментом является исследование собственных частот колебания уровня Охотского моря в диапазоне приливных частот.

Для оценки собственных колебаний был выполнен расчет отклика на единичный длинноволновой импульс, вошедший в Охотское море через Курильские проливы со стороны Тихого океана. Общая длительность моделируемого физического процесса составила 4 месяца. Для ускорения вычислений использовалась батиметрическая карта в меркаторской проекции, что позволило снизить погрешности, связанные с исключением из расчетов сферических поправок.

Каждая пара рисунков соответствует периоду собственной моды длинноволновых колебаний в Охотском море, для которого на спектрограммах наблюдался ярко выраженный экстремум, отражающийся на всех близлежащих точках на поверхности моря.

Показательным фактором оказалось то, что только для найденных таким образом спектральных частот фазовые поверхности, построенные между смежными точками наблюдения, образовывали на поверхности Охотского моря почти идеальные плоскости, с почти идеальными линиями разрывов фазовых поверхностей строго на обратные или π -переходы на линиях смены фаз. Фазовые поверхности изображены в правом столбце нижеприведенной таблицы рисунков.

Передаточная функция (оценка амплитуды)	Фазовые поверхности (стоячие волны)
	
<p>23^ч 48^м Главная мода собственных колебаний, где в качестве стоячей волны откликается вся поверхность Охотского моря (с особенностью в вершине Пенжинской губы). В прилегающей к Курильским островам акватории Тихого океана эта волна рассеивается, образуя прогрессивные волны с фазовыми изолиниями подобно котидальным линиям суточных приливов</p>	
	
<p>16^ч 10^м Собственное колебание Пенжинского залива, ограниченное с севера Пенжинской губой и с юга - морской границей, отмечающей сужение пролива между мысом Южный на полуострове Камчатка и Ямскими островами на материке. Охотское море откликается на это колебание всей своей поверхностью, с плавным усилением интенсивности в направлении к мелководным акваториям вблизи Шантарских островов</p>	
	
<p>12^ч 17^м Полусуточное колебание моря, зарождающееся на мелководье вблизи Шантарских островов. Волна не рассеивается на североохотоморском шельфе, получая усиление, без образования стоячей волны в Пенжинском заливе. Южная глубоководная часть Охотского моря откликается на данную длинную волну всей своей поверхностью</p>	

Передаточная функция (оценка амплитуды)	Фазовые поверхности (стоячие волны)
	
<p>9^ч 19^м Вторая стоячая волна, с морской вершиной вблизи Шантарских островов. Колебание получает полноволновой отклик в Пенжинской губе, с противоположными фазами в ее Южной и Северной акваториях. Показательно то, что линия смены фаз совпадает с аналогичной линией для 12 часовой волны, но пик усиления находится уже не на побережье, а в открытом море</p>	
	
<p>6^ч 41^м Ярко выраженная стоячая волна с четырьмя границами смены фаз. Центральная узловая линия проходит по изобатам, разделяющим Охотское море на глубоководные участки, показывая тем самым, что природа собственных колебаний связана с геометрическими особенностями батиметрии, и стоячие колебания возникают внутри естественных границ, образуемых склонами с наибольшими градиентами наклона морского дна</p>	
	
<p>5^ч 18^м Колебание уровня моря, образованное множеством стоячих волн на северном побережье Охотского моря, через которые происходит обмен длинноволновой энергией между Пенжинским заливом и акваторией Шантарских островов. В южной части Охотского моря эти волны поддерживаются колебанием с постоянной фазой только в вершине залива Терпения</p>	

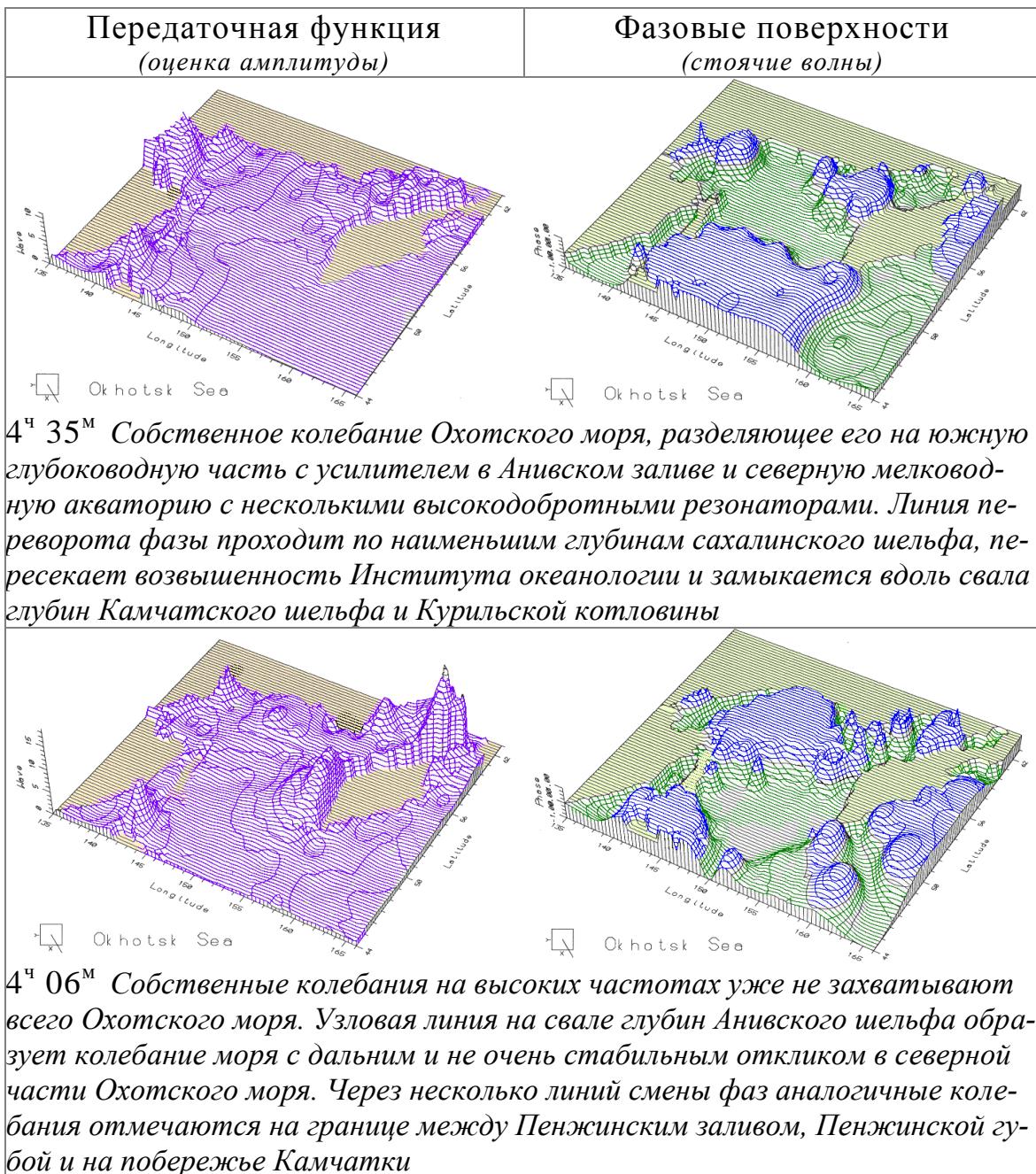


Рис. 4.6. Таблица рисунков с иллюстрациями распределения амплитуд и фазовых поверхностей для собственных длинноволновых колебаний уровня моря на поверхности Охотского моря.

В левом столбце (рис.4.6) изображены поверхности передаточных функций, которые по физическому смыслу соответствуют коэффициентам усиления длинных волн, при взаимном сравнении амплитуд между точками наблюдения на поверхности Охотского моря. Показательным оказалось то, что поверхности передаточных функций по форме очень похожи на распределение по поверхности моря

амплитуд гармонических постоянных, - на частотах близких к астрономическим.

Все рисунки даются с краткими комментариями, которые показывают, что полусуточные и более длинные приливные волны захватывают в свою динамику всю поверхность Охотского моря, в то время как высокочастотные волны стабилизированы только на участках акватории шельфа вблизи узловой точки - резонатора.

Из выполненного вычислительного эксперимента легко делается вывод, что в Охотском море возникает строго детерминированный аккорд длинноволновых колебаний, в котором не содержатся каких-либо промежуточных или нестабильных во времени частот. Полученное распределение амплитуд для различных периодов собственных волн, по сути, соответствует распределению амплитуд гармонических постоянных, измеренных на соответствующих участках побережья.

Результаты прямого численного моделирования приливного режима в Охотском море

Охотское море идеально подходит для исследования численных схем по моделированию приливного режима и режима течений в частично замкнутых акваториях. Замкнутость Охотского моря превращает его в уникальный полигон, на котором возможно разделение приливообразующих сил на внешние, приливные волны, пришедшие из Тихого океана, и внутренние – образовавшиеся под влиянием астрономических сил непосредственно на поверхности Охотского моря.

Важным фактором для выбора Охотского моря является изученность приливного режима во многих пунктах побережья (рис.4.6), что позволяет проводить качественную проверку численных моде-

лей, граничных условий и методов генерации длинноволновых колебаний уровня и вызываемых ими течений.

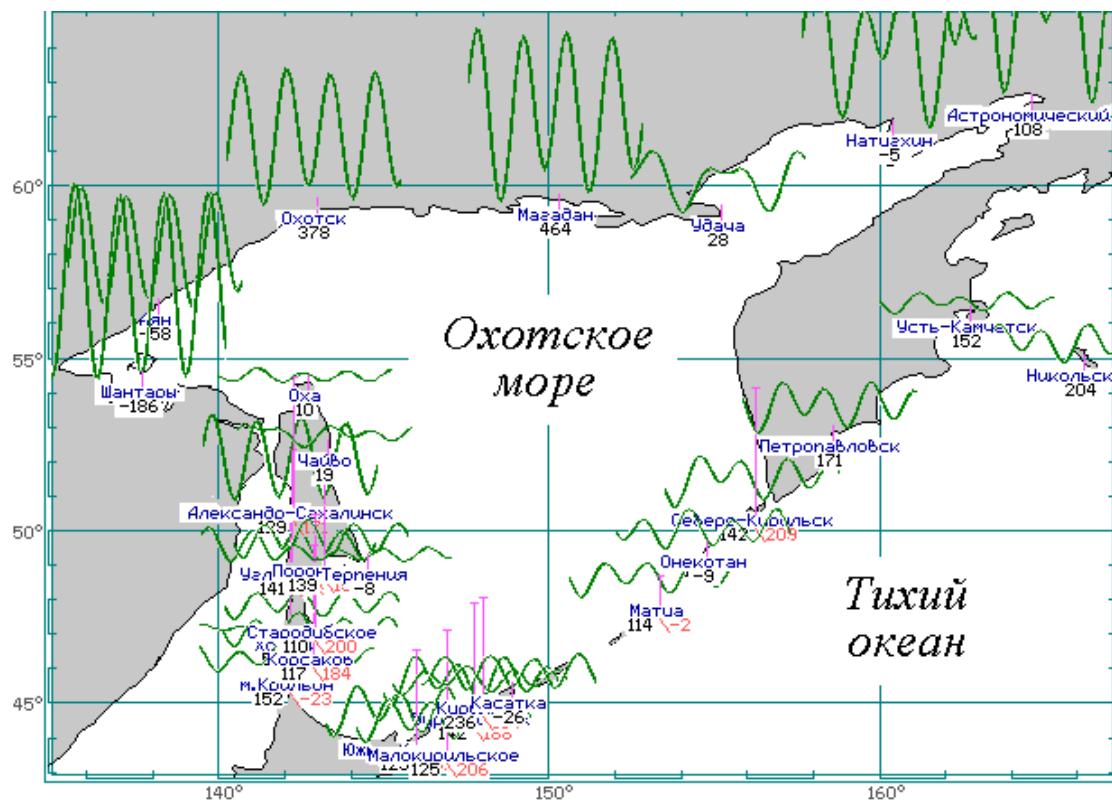


Рис. 4.7. Обзорная карта приливного режима для побережья Охотского моря, показываемая программой Mario и иллюстрирующая ход уровня моря с использованием четырех главных гармонических постоянных M2, S2, K1, O1 (Огуря, 1933). Для численного моделирования приливного режима были использованы возбуждающие точки на Курильских островах. По всем другим точкам внутри Охотского моря проводилась оценка качества моделирования и сравнение с натурными данными.

Учитывая, что приливной режим во многом определяется свойствами его шельфовых акваторий, являющихся вынужденными резонаторами длинноволновых колебаний в диапазоне приливных волн, постановку вычислительного эксперимента предваряло изучение геометрических характеристик приливных волн, наблюдавшихся на этих относительно мелководных близ береговых акваториях.

Постановку полной задачи на восстановление приливного режима предваряло исследование отклика Охотского моря на полусуточную составляющую прилива M2, которая очень быстро восста-

навливается в случае задания гармонических постоянных вдоль всей Курильской гряды.

Полусуточная составляющая прилива M2 очень быстро приводит всю акваторию Охотского моря в режим вынужденных колебаний, если внешнее возмущение будет задаваться вдоль островов и проливов Курильской гряды. Особенностью приливной компоненты M2 для Охотского моря является то, что один из ее котидальных узлов расположен как раз в районе освоения нефтепромыслов на сахалинском шельфе, и положение этого узла оказалось очень чувствительным к используемому в вычислительной модели коэффициенту придонного трения. Так, если воспользоваться стандартным [Kim Kye Yong, 1992] для северных морей коэффициентом: $K_v = 0.0025$, то котидальный узел исчезает с поверхности Охотского моря, при этом по фазовым линиям видно, что он смешен далеко в глубь острова Сахалин. Если же при моделировании не используется донное трение, то узел смещается от побережья Сахалина далеко в море.

Обнаружение управляемой чувствительности местоположения котидального узла позволило установить этот узел в нужное место путем подбора коэффициента придонного трения. Для конкретных условий проведения вычислительного эксперимента этот коэффициент оказался равным: $K_v=0.0013$. При этом не делается оценок о реальном коэффициенте донного трения, так как разница $\delta K_v = 0.0012$, по сравнению с общепринятым $K_v=0.0025$, может быть обусловлена вязкостными свойствами сеточной схемы, использованной в вычислительной модели.

Простейший способ введения в расчетную область приливной волны - это генерация внешнего возмущения на свободных границах

с помощью периода и амплитуды входящей волны, которые могут быть заданы с помощью приливных гармонических постоянных¹.

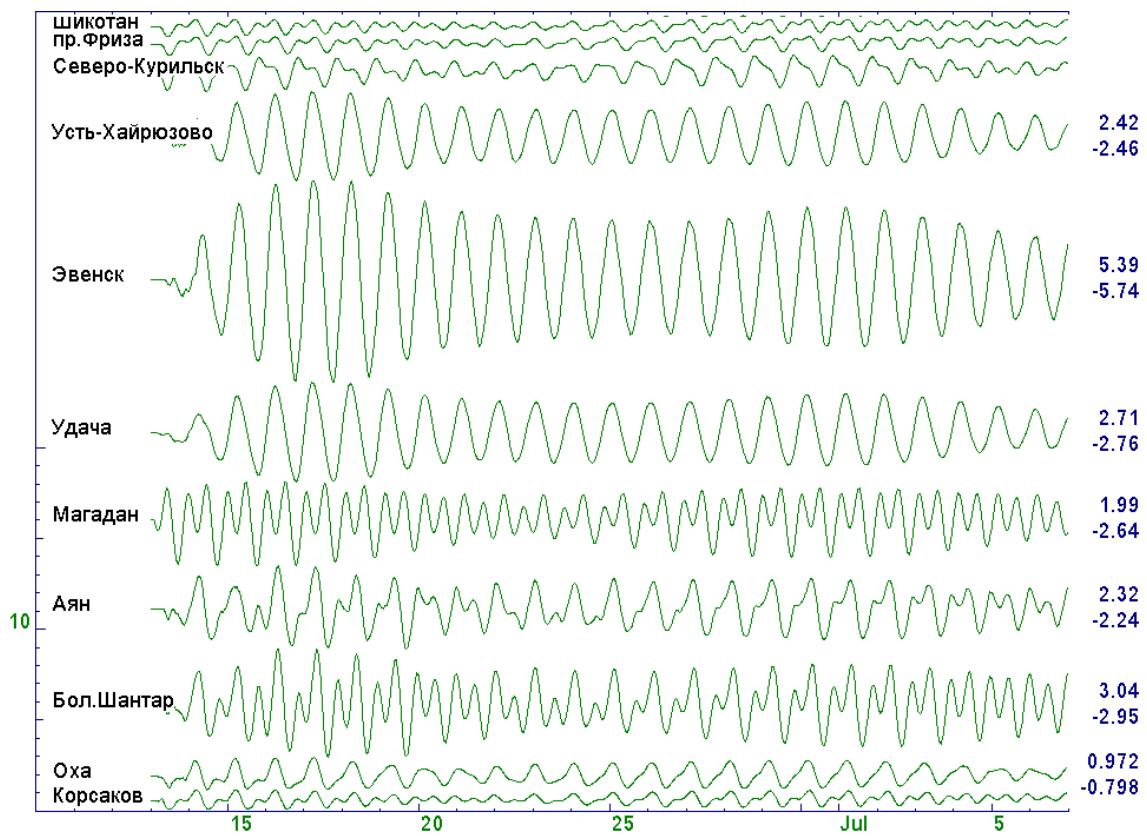


Рис. 4.8. Записи колебаний уровня моря в различных точках наблюдения, зарегистрировавшие начальный период вычислительного эксперимента по моделированию приливного режима в Охотском море. Вычисления производились на батиметрической карте с шагом сетки 20 км. Цифры справа показывают максимальные и минимальные значения уровня моря в изображенном интервале времени. Отметки на левой границе задают масштабную шкалу с шагом 1 м

Для качественного восстановления приливного режима в Охотском море были установлены генераторы уровня моря в районе Северо-Курильска, вблизи острова Матуя, бухты Касатка, Курильска и

¹) Длительные во времени измерения скоростей течения невозможны по чисто техническим причинам. Невозможно также и предсказание потоков жидкости в море и вблизи побережья с помощью гармонического анализа, так как динамика течений обуславливается не только длинноволновыми процессами, но также и устойчивыми во времени и подвижными в пространстве вихревыми потоками в открытом море, которые аккумулируют энергию взаимодействия атмосферы и океана в виде замкнутых течений, существенно влияющих на изменчивость во времени гидродинамических процессов в локальных акваториях.

поселка Малокурильское, а также в проливе Лаперуз на мысе Крильон и вблизи порта Корсаков. Оценка качества восстановленного прилива производилась по точкам в вершине Пенжинской губы и в районе Шантарских островов.

На рис.4.8 показаны записи хода уровня моря, полученные в процессе численного восстановления приливного режима, на основании которых можно сделать вывод об установлении формы приливных колебаний примерно через неделю расчетного времени. Этому факту соответствует приведение в соответствие фазовых и амплитудных характеристик моделируемого и реально наблюдаемого прилива.

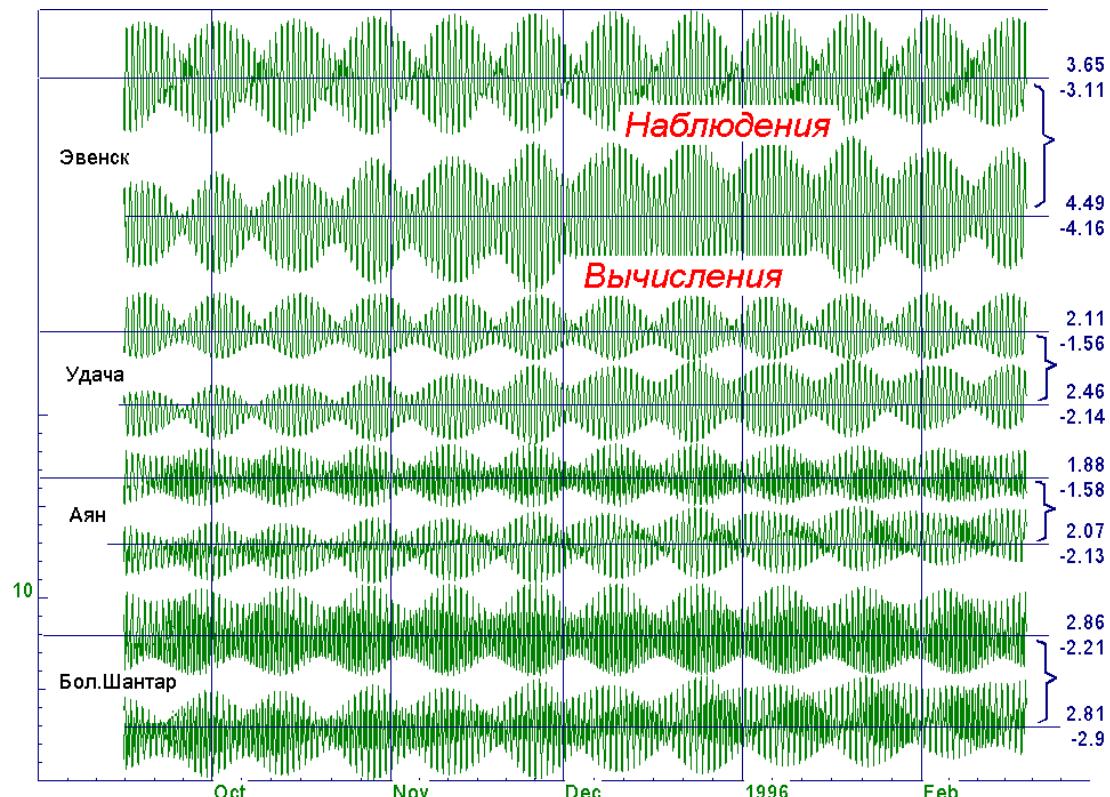


Рис. 4.9. Продолжение вычислительного эксперимента с целью попарного сравнения предвычисленного по гармоническим постоянным (верхний ряд) и восстановленного (нижний ряд) прилива в нескольких пунктах Охотского моря, удаленных от генераторов вынужденных колебаний. Цифры справа показывают максимальные и минимальные значения уровня моря. Отметки на левой границе задают масштабную шкалу с шагом 1 м.

На основе численного анализа этих метеограмм можно найти длительность процесса установления приливных (вынужденных) ко-

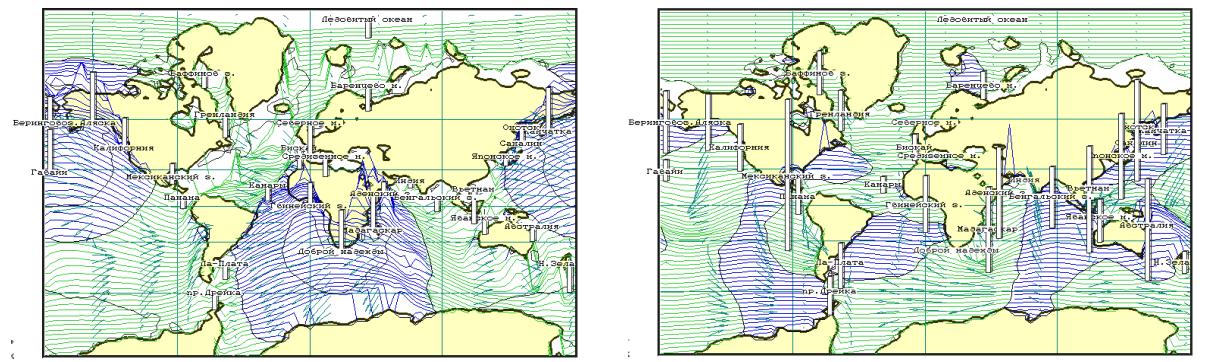
лебаний Охотского моря, который равен примерно 1-му месяцу. Этому сроку соответствует стабилизация среднего уровня моря во всех точках расчетной области, - очень любопытного процесса, который можно использовать для моделирования постоянных течений, возникающих в том случае, если средний уровень в точках генерации приливных волн не удерживать на нулевой отметке, а попытаться вывести на какой-либо другой, наперед заданный средний уровень.

Рис. 4.9 подтверждает факт качественного восстановления приливного режима в Охотском море. Тем не менее, различие в ширине темной полосы означает, что в вычислительном эксперименте отчасти занижена полусуточная составляющая прилива. Нельзя не заметить также вычислительной проблемы, связанной с полугодовым изменением хода огибающей приливного уровня моря в пункте Эвенск.

Приливные гармоники Охотского моря, близкие к суточным, хорошо моделируются с помощью “генераторов волн” установленных вдоль Курильской гряды, однако полусуточные и более высокочастотные колебания оказываются отчасти ослабленными, так как в приведенном вычислительном эксперименте не учитывалось влияние приливообразующих сил, действующих непосредственно на поверхности Охотского моря.

Прямое численное моделирование прилива на Земном шаре

Существенно более сложный блок вычислительных экспериментов, реализованный в действующем программном комплексе, предназначен для моделирования приливного режима уровня моря и режима приливных течений в полных потоках.



а) первый час моделируемого приливного процесса

б) на седьмые сутки форма приливной волны становится близкой к реальности

Рис. 4.10. Изображение на графическом экране ЭВМ в процессе проведения вычислительного эксперимента по прямому моделированию приливного режима для всего земного шара. Прилив вызывается воздействием гравитационных полей Луны и Солнца. Исходя из пространственных аппроксимационных критериев, обусловленных ограниченными вычислительными ресурсами, из расчетов исключается большая часть континентального шельфа

Для проверки корректности проведения прямых вычислительных экспериментов по моделированию приливных колебаний уровня моря под прямым воздействием астрономических сил Луны и Солнца, был поставлен специальный эксперимент и проведено восстановление приливного режима для всего земного шара. Однако, ввиду ограниченных вычислительных ресурсов, доступных для проведения столь глобальных вычислительных экспериментов, по результатам моделирования можно сделать только качественную оценку корректности физической и математической постановки задачи и о возможности ее практической реализации.

4.3. Исследование гидродинамического режима на акватории Холмского морского порта

Географически порт Холмск расположен в вершине глубоководного япономорского желоба, а его внутренняя акватория чисто и без каких-либо внутренних трансформаций длинных волн откликается на длинноволновые процессы в Японском море с периодами волн более 3 мин. Высокоточная регистрация уровня моря в порту пред-

ставляла безусловный интерес для изучения новых методов оперативной диагностики и прогноза опасных морских наводнений, возникающих на акватории Японского моря и проявляющихся на Сахалинском побережье [Волны..., 1985].

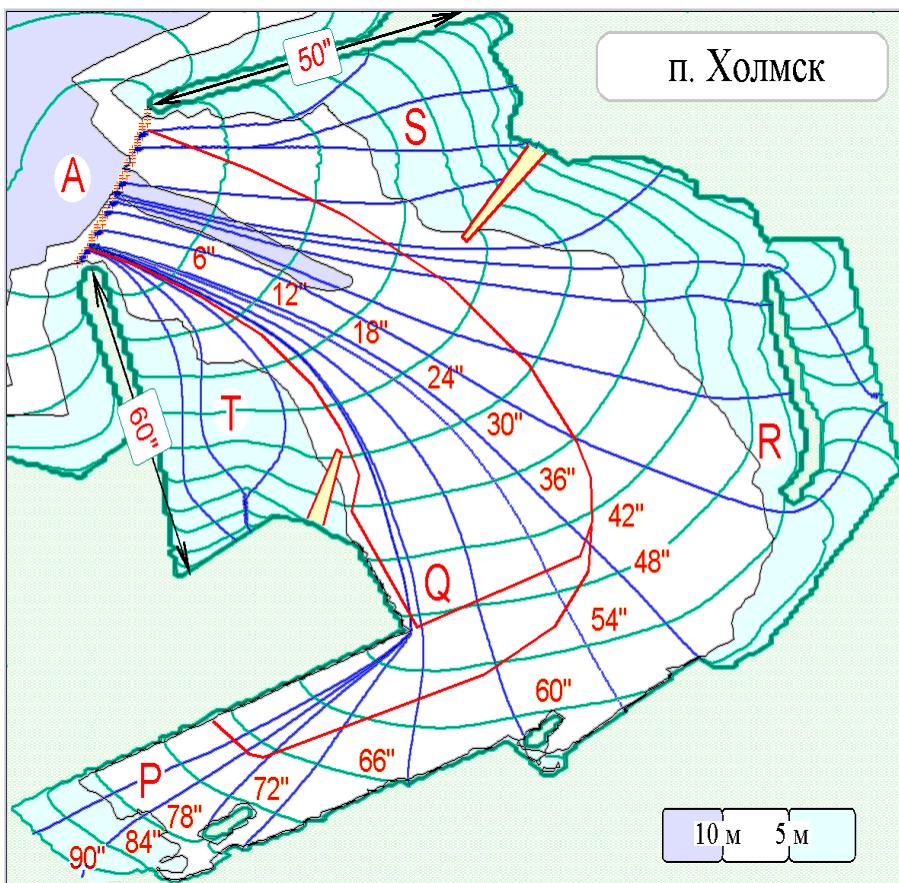


Рис. 4.11. Батиметрическая карта и кинематическая схема длиноволновых процессов на акватории Холмского морского торгового порта с указанием расчетных подобластей: А – входные ворота порта, Т – входной фарватер и южная ловушка ветровых волн, С – северная ловушка, Q – область дноуглубительных работ в районе восьмого причала, R – район внутренней восточной гавани, P – южная гавань порта.

На рис. 4.11 показаны расчетные лучи и фронты распространения волн от ворот порта в глубь его акватории, которые подтверждают практически полный возврат отраженной из порта волны ровно через 2 мин.

Свободному проникновению длинных волн на акваторию порта практически не препятствуют два очень узких оградительных мола, что объясняется важным свойством длинных волн, способных реа-

гировать и деформироваться только на препятствия соизмеримых с их длиной.

В соответствии с исходным проектом, реализованным японскими гидростроителями, порт защищен от штормовых волн и волн зыби открытого моря с периодами 10-12 с. Именно такие волны преобладают при прохождении штормов в Татарском проливе. Основная энергия штормовых волн гасится на мелководных пляжах на подходах к Холмскому порту, а отражаемые от волнозащитных молов волны отводятся в разные стороны, в специально устроенные волновые ловушки с очень пологим подъемом дна, отчего во входных воротах не образуется интенсивной толчей.

Проектные особенности Холмского морского торгового порта

Входные ворота порта практически полностью блокируют прохождение штормовых волн с указанными периодами на операционную акваторию порта, что подтверждается довольно любопытным фактом: у причалов порта возникает интенсивное волнение с половинными периодами, не превышающими 5-6 с. Обычно в волновой гидродинамике удвоение частоты вынужденных колебаний связывается с существенно нелинейными процессами на маршруте распространения волн [Егоров, 1974], что и было использовано для блокирования проникновения штормовых волн через входные ворота порта. Как выяснилось, наблюдаемые волны малых периодов являются искусственными, так как рождаются на акватории порта и поддерживаются высокой резонирующей способностью отдельных участков его морского дна.

Таким образом, акватория Холмского порта хорошо защищена от штормовых волн и зыби и имеет широкий выход для излучения в открытое море внутренней длинноволновой энергии, которая на за-

мкнутых акваториях имеет свойство аккумулироваться на участках морского дна с активным откликом на длинноволновые колебания.

Несмотря на добротность проектных решений при строительстве искусственной гавани, в последнее время наблюдается ухудшение волнового режима на акватории порта в результате последней реконструкции, связанной с вводом в эксплуатацию второй очереди паромной переправы. При этой реконструкции были разрушены внутренние молы у волновых ловушек S и T (Рис. 4.21), а также сильно укорочен и оборван на мелководном участке восточный мол (зона R), который ранее образовывал внутреннюю гавань для маломерных судов.

Наблюдения за развитием штормового волнения на подходах к порту выявили отражение волн от насыпного искусственного берега, расширившегося за счет моря южную часть наземной территории порта. Отраженные штормовые волны теперь не гасятся на пологом пляже, а возвращаются к воротам порта и устраивают на его входе толчью повышенной амплитуды. Ухудшение волнового режима в целом стало столь заметным, что Холмский морской торговый порт был выведен из состава сахалинских портов-убежищ.

Таким образом, одной из важных целей настоящего исследования виделся поиск рекомендаций по восстановлению волнозащитных механизмов, существовавших ранее в Холмском порту, самые эффективные или простые из которых могли бы быть реализованы при проведении текущих берегоустроительных и дноуглубительных работ.

Вычислительные эксперименты для выявления аккордов собственных длинноволновых колебаний

Собственные колебания прибрежных акваторий сложно выявлять аналитическими или экспериментальными методами, но они

довольно точно моделируются прямыми вычислительными экспериментами, основанными на разностных уравнениях динамики жидкости в полных потоках [Храмушин, 1988]. При постановке вычислительной задачи на выявление аккордов собственных частот учитываются следующие физические особенности проявления длинноволновых процессов над геометрически сложным рельефом морского дна:

1. Если на акваторию морского порта непрерывно воздействует внешнее длинноволновое возмущение на строго определенной частоте, то во всей акватории устанавливаются периодические колебания строго на заданной частоте, при этом амплитуда и фаза волн в конкретных точках будет зависеть от пространственной геометрии и резонирующих свойств, близлежащих к этой точке участков.
2. Если на замкнутую акваторию воздействует короткий единичный импульс, то в ней возникают свободные колебания. Вследствие ярко выраженных дисперсионных свойств волнения моря, обусловленного сильными конвективными течениями в областях со сложной геометрией дна, в исследуемой акватории образуются длинноволновые колебания во всем диапазоне более низких частот, чем содержалось в исходном единичном источнике.
3. Учитывая, что в реальной морской акватории всегда присутствуют области с повышенными резонирующими свойствами, следует ожидать, что по прошествии некоторого времени все колебания в заданной акватории приобретут свойства полосового спектра, где каждый локальный участок будет иметь характерный аккорд собственных колебаний, определяемый ее собственными топологическими и резонансными свойствами.

Таким образом, в результате короткопериодного импульсного возмущения морской акватории вся акватория возбудится в широком спектре собственных колебаний, а по прошествии некоторого

времени в ней останутся колебания только на тех частотах, которые будут поддержаны рельефом морского дна, образующим либо усилители амплитуды, либо аккумуляторы энергии этих волн.

В результате проведения серии вычислительных экспериментов были выявлены участки морского дна, на которых происходит усиление интенсивности или аккумуляция энергии волновых колебаний, возникающих под воздействием различных внешних источников возмущения, таких как атмосферные циклоны, прибрежные сейшевые колебания уровня, длинная штормовая зыбь и другие источники длинноволновых процессов открытого моря.

Численное моделирование длинноволнового режима на подходах к Холмскому порту.

Вычислительные эксперименты по моделированию длинноволновых процессов в открытых акваториях Японского моря выполнялись с использованием модели батиметрии, оцифрованной с навигационной карты меркаторской проекции (Рис. 4.12). Размер сеточной области составлял 281x156 узлов, шаг сетки на приведенной широте 52° составлял 1 км. Для соблюдения пространственных аппроксимационных критериев была введена ограничивающая глубина – 12 м. Ближайшая к

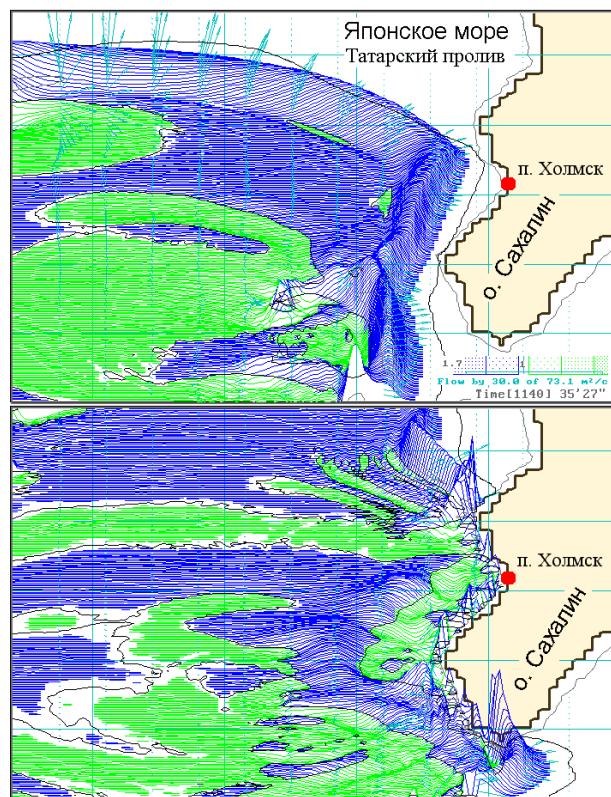


Рис. 4.12. Изображение двух кадров на экране ЭВМ при моделировании длинноволнового импульса с периодом 5 минут, подходящего из открытого моря к побережью острова Сахалин. Расчетное время для верхнего рисунка 35 мин 27 с, нижнего – 57 мин 28 с. Максимальная амплитуда волн на верхнем рисунке составляет 1,7, на нижнем – 2,9

порту Холмск контрольная точка стояла на 17-метровой изобате, где 5-минутная волна аппроксимировалась с помощью четырех длин условных расчетных ячеек. В качестве начальных условий задавалась одиночная полуволна синусоидальной формы, входящая в акваторию через свободную границу расчетной области в северо-восточном направлении с амплитудой 1 м и периодом 5 мин.

По глубоководному желобу длинноволновые возмущения в Японском море очень быстро распространяются и достигают Холмского порта, что можно использовать для оперативного реагирования на изменение гидродинамической или штормовой активности в открытом море, а также с целью оперативного предупреждения удаленных участков побережья об опасных морских наводнениях и цунами.

Сложный рельеф морского дна сильно искажает первоначальный фронт волны наводнения, а на подходах к порту Холмск эти волны сильно рассеиваются в глубоководном желобе. Справедливо и обратное: если волна подходит к побережью с задержкой, например при торможении на прибрежных банках севернее порта Холмск, то при ее подходе к берегу проявится «эффект линзы» и волна будет иметь максимальную амплитуду. Указанные процессы иллюстрируются рисунком 4.13.

Однако высказанное справедливо только для первого вступления волны типа цунами, дальнейшее развитие процесса волнобразования вблизи побережья будет всецело зависеть от резонансных свойств мелководья вблизи побережья. На Рис. 4.30 просматриваются равномерно распределенные вдоль берега всплески гребней захваченных краевых волн, которые могут очень долго существовать в области проведения вычислительного эксперимента и проявляются при спектральном анализе результатов в виде собственных волновых аккордов, характеризующих конкретные участки побережья.

Из оценок длинноволновых аккордов в акваториях юго-западного побережья острова Сахалин можно сделать вывод, что на записях Холмского метеографа должны проявляться колебания уровня моря с периодом около 8 мин, источником которых являются длинноволновые резонаторы, аккумулирующие и усиливающие энергию захваченных волн в районе острова Монерон и на шельфе вблизи г. Чехов.

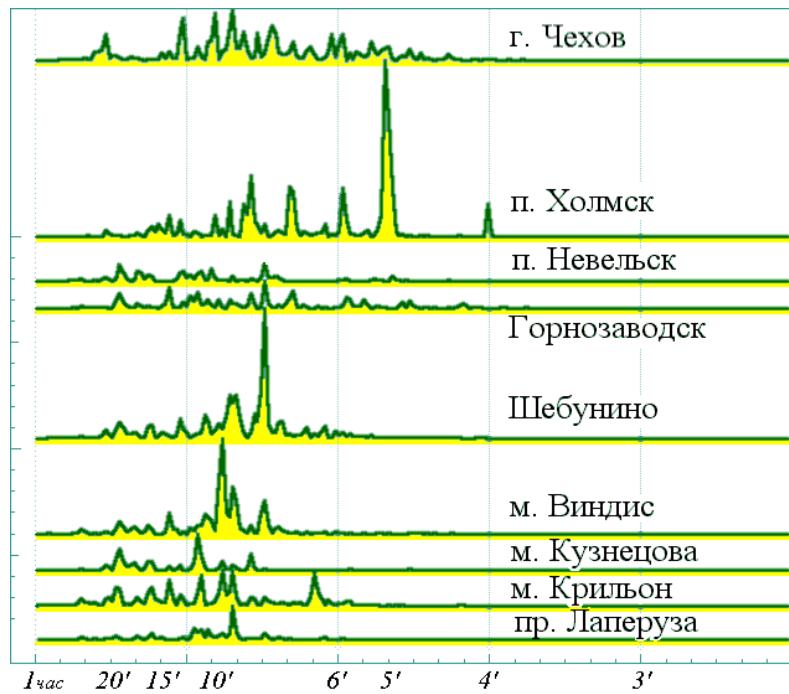


Рис. 4.13. Спектральное представление аккордов собственных длинноволновых колебаний, характеризующих различные участки побережья о-ва Сахалин. В районе порта Холмск прибрежный шельф имеет наименьшую ширину, что не способствует зарождению сейшевых колебаний уровня моря и не благоприятствует прохождению вдоль берега захваченных волн, родившихся на удаленных участках шельфа Японского моря

Численное моделирование резонансных колебаний уровня моря на акватории Холмского порта

Расчеты волнового режима на акватории Холмского морского торгового порта выполнены с использованием цифровой модели батиметрии порта с шагом оцифровки 3 м. и размером матрицы 269 x 180 узлов. Пространственная аппроксимация позволяла с помощью 3 условных ячеек вести волну с периодом 3 с по глубине 1 м.

В южной и северной волновых ловушках (рис.4.14) происходит увеличение амплитуд и смещение фаз входящих в порт волн. На

входе эти волны частично сохраняют свои трохоидальные свойства, отчего при выходе на мелководные пляжи волновых ловушек - самоуничтожаются.

Если же часть энергии трохоидальных волн преобразуется в длинноволновую, то на выходе из ловушек эти длинные волны гасятся во взаимодействии с другими волнами, входящими в порт со стороны открытого моря.

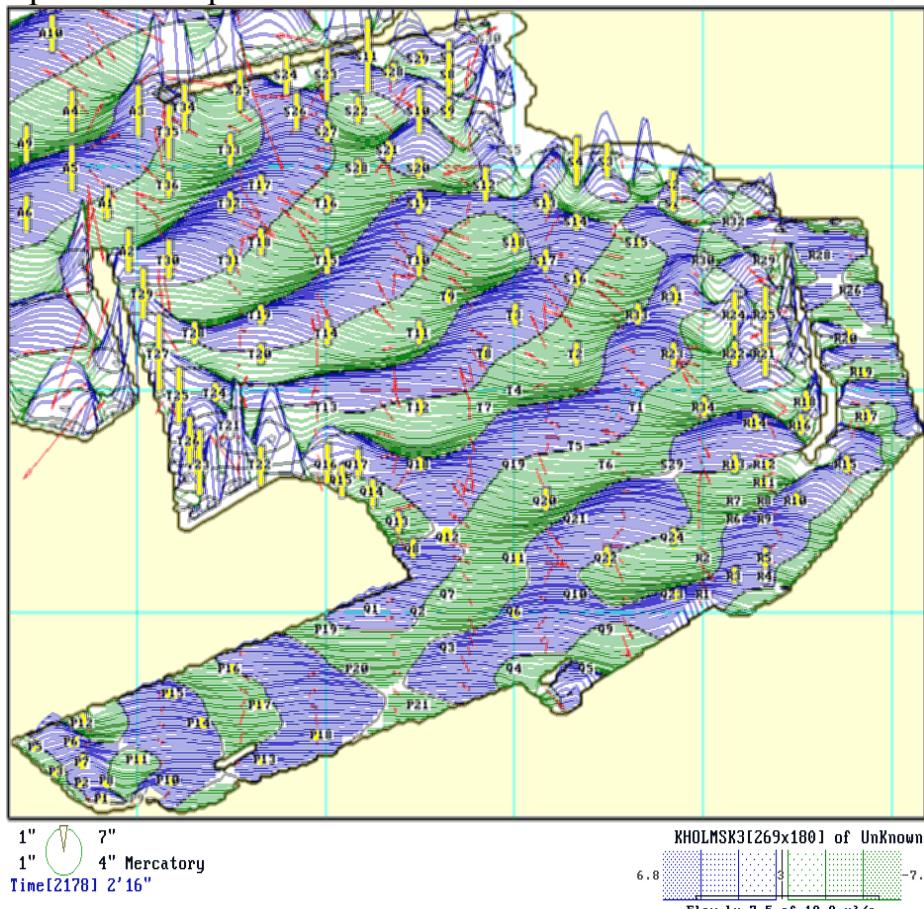


Рис. 4.14. Изображение на экране ЭВМ в процессе проведения прямого вычислительного эксперимента по моделированию волнового режима в Холмском морском торговом порту. На рисунке показан ход моделирования непрерывного гармонического воздействия от штормовых волн с характерным периодом 10 с северо-западного направления. В поле изображения показаны точки наблюдения за текущими колебаниями уровня моря и течениями, рядом с которыми проставлены столбики с максимальными амплитудами волн, зарегистрированными на текущий момент в данных точках

Для поиска длинноволновых резонаторов на акватории Холмского порта было установлено 326 точек наблюдения за уровнем моря и течениями. Начальные условия задавались в качестве одиноч-

ного импульсного источника, входящего в порт с периодом 3 с. В спектральном анализе использовались расчетные волнограммы в интервале времени начиная с 9 до 18 ч. Таким образом, почти полностью исключалось влияние исходного начального возмущения.

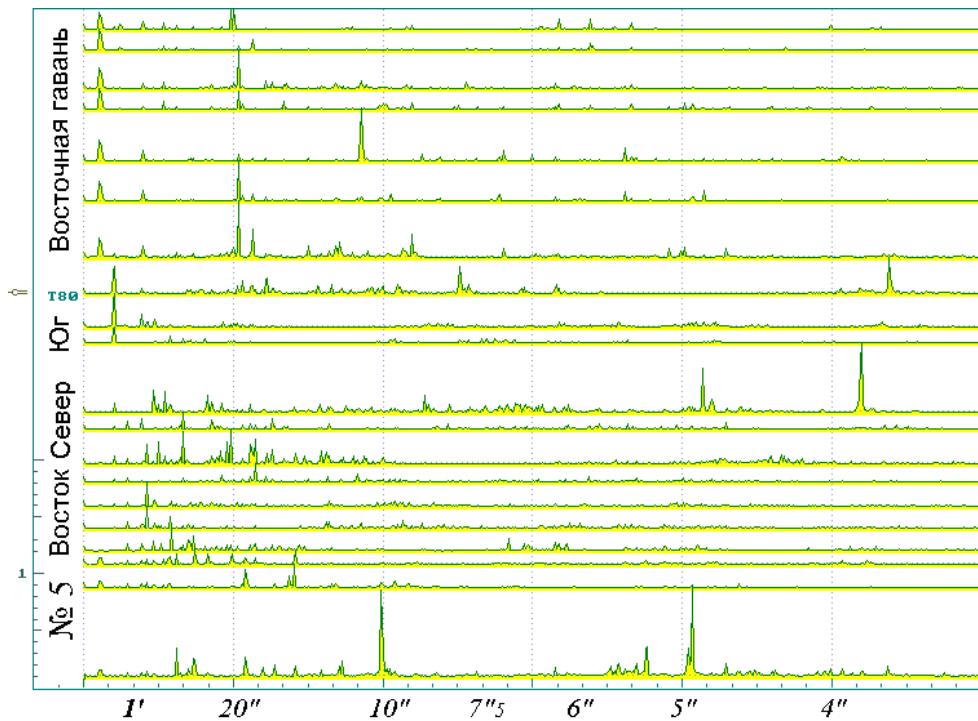


Рис. 4.15. Аккорды спектральной энергии собственных длинноволновых колебаний в различных точках на акватории Холмского морского торгового порта. 3 нижних спектrogramмы относятся к волнению у причала № 5, находящегося в самой удаленной южной гавани порта; выше – спектrogramмы для восточного берега порта с внешней стороны от внутренней гавани; затем – в северной части порта и южной волновой ловушке. Сверху приведены спектrogramмы, относящиеся к внутренней восточной гавани. На горизонтальной шкале показаны периоды волн. Масштаб всех графиков одинаков

При расчете спектров использован алгоритм FFT со сглаживающим окном длиной $2^{11}=2048$ точек. Рис. 4.15 подтверждает, что на акватории порта зарождаются различные длинноволновые колебания в диапазоне периодов от 3 с до 1,5 мин, которые в анализируемом интервале времени проявляются в виде полосовых спектров.

Для анализа результатов вычислительных экспериментов строились следующие пространственные поля, характеризующие распределение параметров волнения по акватории Холмского морского торгового порта: 1) поле передаточной функции, которая характери-

зует изменение амплитуды волны относительно опорной точки, расположенной в открытом море на входе в порт; 2) пространственное распределение спектральной плотности энергии длинноволновых колебаний уровня моря на акватории порта; 3) пространственное распределение фазы волны относительно опорной точки во входных воротах порта

Если в порту образуются стоячие резонансные колебания уровня моря, то фазовые функции должны образовывать плоскости с резкими границами разрывов на величину π . Такие линии разрывов являются линиями смены фаз стоячих колебаний (узловые линии), и обычно расстояние между такими линиями соответствует полудлине волны на данной частоте.

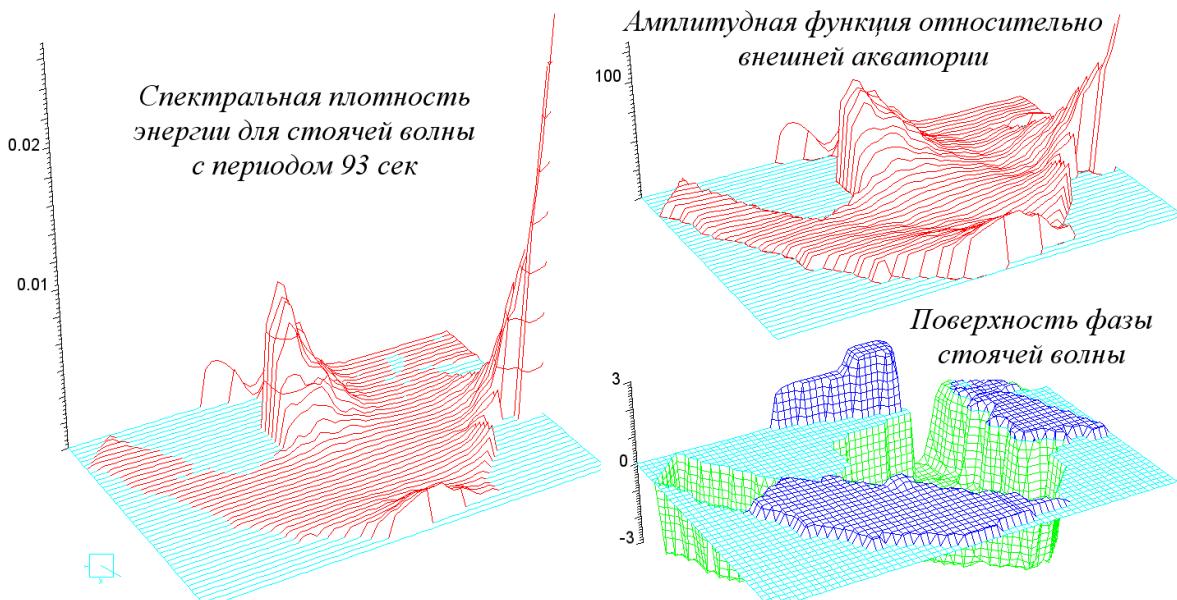


Рис. 4.16. Визуализация пространственного распределения функции энергетического спектра (слева), амплитудной функции (справа вверху) и относительной фазы (справа внизу) для стоячей волны с периодом 1 мин 32 с в порту Холмск

Устойчивая волновая мода с периодом 1 мин 32 с образуется длинноволновым откликом по максимальному расстоянию между мелководьем у северного мола и дальней границей у причала в южной гавани порта (рис.4.16). Маршрут волновых движений этой волны проходит по очень сложному рельефу дна порта и имеет прони-

цаемую границу со стороны открытого моря, что не позволяет этой волне активно проявляться у причалов. Если же волна с таким периодом будет нагнетаться со стороны моря, то она проявится только в волновых ловушках и у стенки внутреннего мола (рис. 4.17).

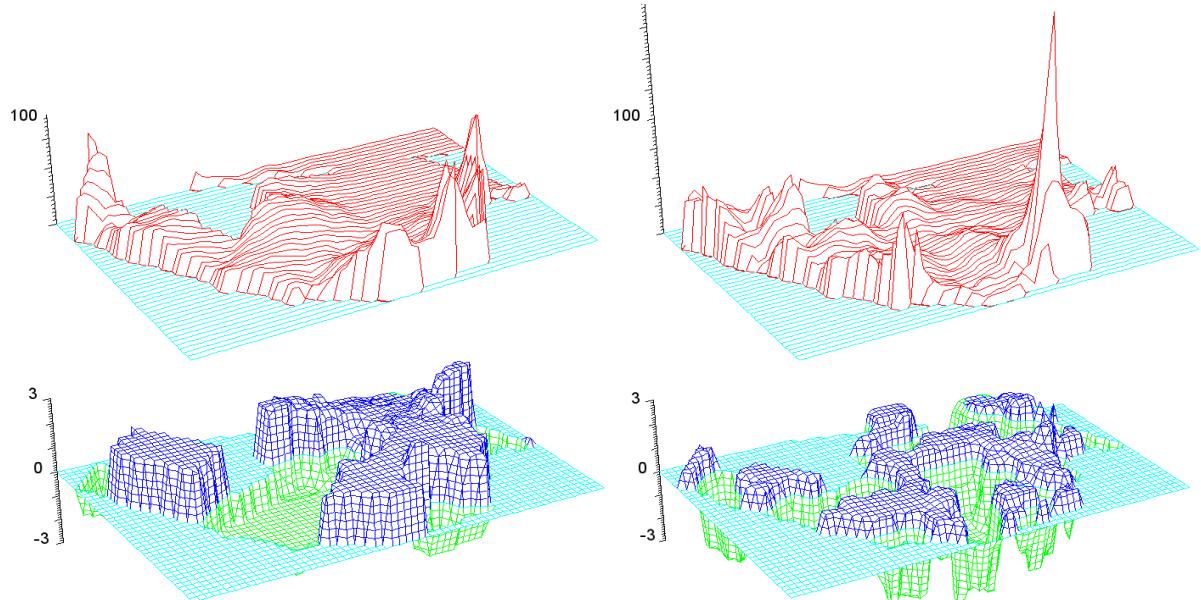


Рис. 4.17. Форма установившихся длинноволновых колебаний уровня моря, аккумулирующих волновую энергию с периодом собственных колебаний 55 с (слева) и 26 с (справа). На верхних рисунках показана форма превышений амплитуд поверхности моря по отношению к входным воротам порта. На нижних – плоские поверхности равных фаз.

Волновые моды с периодами 55 и 26 с образуются на хорошо обусловленных волновых резонаторах и являются наиболее опасными для судов, находящихся в порту. Эти колебания уровня моря имеют ярко выраженные узловые линии у рабочих причалов порта, что означает возможность появления здесь больших скоростей течений, что как раз и ассоциируется с явлением тягуна. Однако для развития подобных длинноволновых колебаний довольно редко создаются штормовые условия на подходах к Холмскому порту, а зыбь с такими большими периодами в Японском море наблюдается крайне редко.

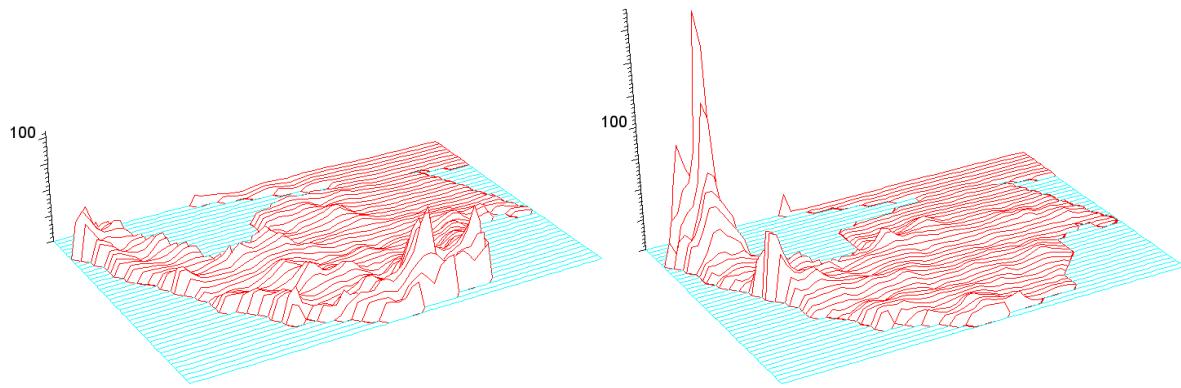


Рис. 4.18. Характерные распределения передаточных функций для амплитуд волн относительно входных ворот порта с периодами 10,81 с (слева) и 6,86 с (справа). Масштаб у обоих рисунков одинаков.

Другие, более высокочастотные длинноволновые колебания уровня моря, с периодами от 5 до 15 с, всегда образуются и аккумулируются на локальных участках акватории Холмского морского торгового порта. Такие волны наблюдаются невооруженным глазом при любом шторме, однако, обычно эти волны не представляют большой опасности для стоящих в порту судов.

Показанные выше длинноволновые колебания уровня моря в Холмском морском торговом порту хорошо прописываются на всех волнограммах, полученных при наблюдениях за волновым режимом в Холмском морском торговом порту. Характер собственных колебаний в порту Холмск подтверждает высокое качество его проектирования.

Из анализа результатов вычислительного эксперимента для акватории порта было выявлено несколько плоских придонных террас, которые способствуют усилинию волнения в порту при прохождении сильных штормов. Все эти террасы ограничены с одной стороны берегом, а с другой – резкими свалами глубин: *первая* – с глубиной около 2,5 м, образовавшаяся в результате разрушения внутреннего мола и углубления фарватера для второй очереди паромной переправы; *вторая* – обширная мелководная терраса с глубиной около 1,5 м между молом внутреннего ковша и глубоководным фарвате-

ром; *третья* – плоское мелководье с глубинами 1-1,5 м в северной части порта.

Рекомендации по улучшению волнового режима сводятся к уничтожению всех подводных горизонтальных террас, чтобы на их месте остались только плавные (*клинообразные*) наклоны морского дна, что не допустит аккумуляции волновой энергии на акватории порта. Безусловно, полезным было бы восстановление всех внутренних молов, которые, в соответствии с исходным проектом и – с результатами численного моделирования, способны эффективно стабилизировать уровень моря при поступлении на акваторию порта поверхностных (*Герстнеровских*) волн со стороны штормового моря.

4.5. Районирование южной части острова Сахалин по проявлениям морских наводнений

Интенсивность морских наводнений в существенной степени зависит от периода действующих вблизи побережья длинноволновых явлений, интенсивность которых в наибольшей степени зависит от геометрических свойств рельефа морского дна на подходах с моря к этому побережью.

Близкие источники сейшевых колебаний уровня моря, обычно это штормовые циклоны или тайфуны, за счет трансформации волн зыби, вызывают длинноволновые колебания уровня моря с периодом порядка $3\div6$ минут. Если длинная волна зарождается в открытом море, на акваториях вблизи свала глубин континентального шельфа, то на побережье она может проявиться в виде наводнения или цунами с периодом порядка $10\div15$ мин. Далекие цунами, возникающие на очень большом удалении или на противоположном берегу Охотского моря, обычно проявляются с периодами более 20 мин (заоке-

анские – более 30÷40 мин), и характеризуются медленными (приливными) подтоплениями побережья.

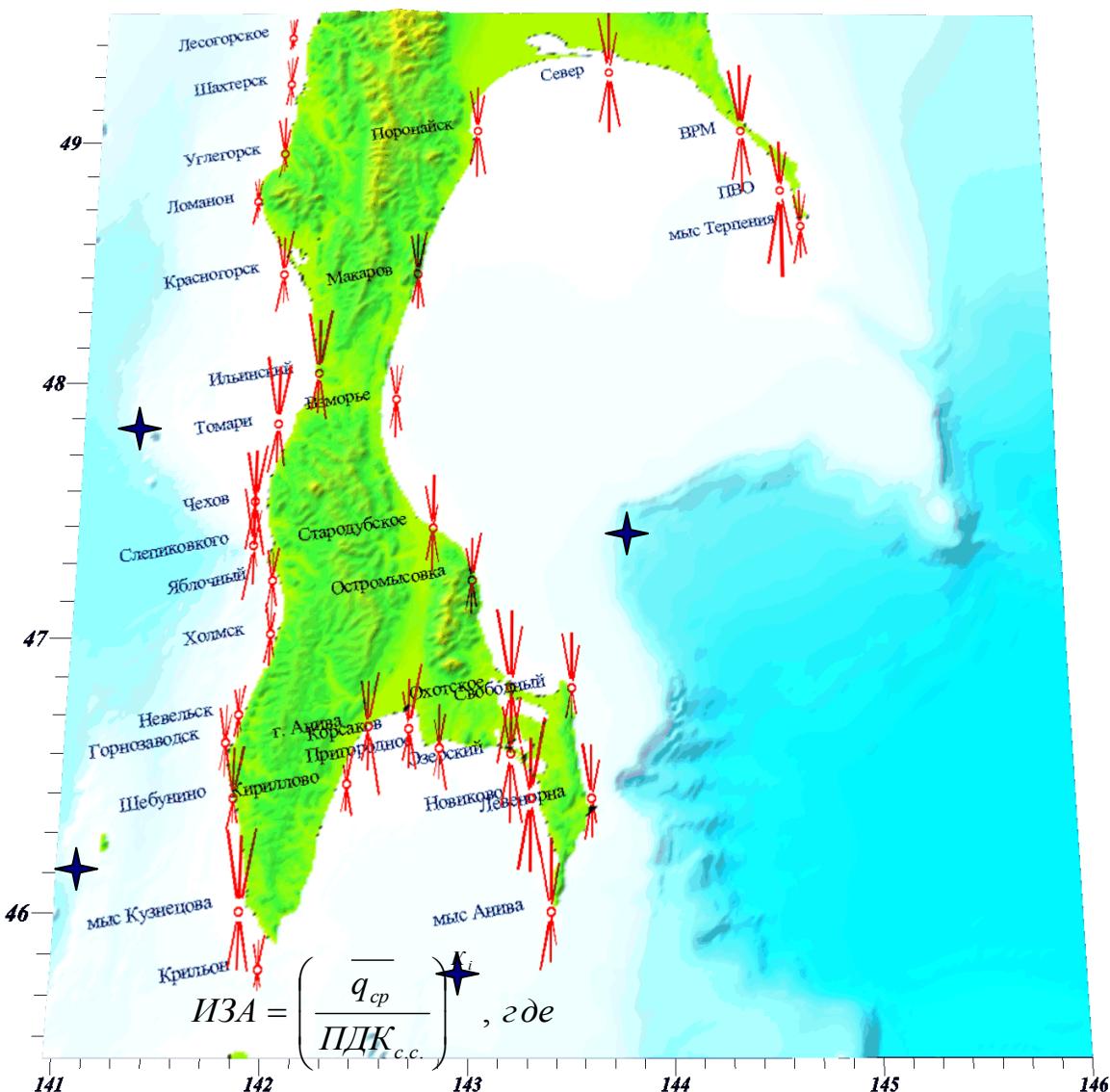


Рис. 4.19. Оценки максимальных заплесков и отливов на побережье в южной части острова Сахалин, полученные по результатам серии вычислительных экспериментов, в которых в качестве начального возмущения задавалась одиночная волна, подходящая к острову Сахалин со стороны открытого моря. Длина лучей, отклоненных влево, соответствует экстремальным значениям колебаний уровня моря при воздействии длинных волн с периодом 6 минут; центральные – 10 мин; правые – 20 мин. Крестиками отмечены точки, относительно которых выполнена нормировка прибрежных метеографических записей

Проведение вычислительных экспериментов по районированию побережья о воздействии наводнений с периодами менее 5 минут сопряжено с рядом трудностей, обусловленных необходимостью использования больших батиметрических массивов с мелким шагом

расчетной сетки, что, в свою очередь, требует чрезмерно больших вычислительных ресурсов ЭВМ. Поэтому при проведении серии вычислительных экспериментов было выполнено моделирование воздействия на побережья наводнений с тремя периодами волн: 6, 10 и 20 мин.

При проведении вычислительных экспериментов использовалась цифровая батиметрическая карта в меркаторской проекции с шагом сетки 1 км, покрывающая южную часть острова Сахалин и прилегающие морские акватории расчетной сеткой размером 450x380 ячеек.

В расчетах с периодами волн 6 и 10 минут устанавливалось аппроксимационное ограничение по минимально допустимой глубине равное 10 метрам, а при расчетах с периодами 20 минут – 2.5 метра. В качестве начальных условий использовалась одиночная полуволна положительного полупериода, которая генерировалась на южной границе расчетной области.

После проведения каждого из вычислительных экспериментов величины экстремальных морских наводнений и понижений уровня вблизи побережья были нормированы на соответствующие максимальные уровни моря, зарегистрированные в морских точках, расположенных в открытых морских акваториях на удалении от берега. Точки, относительно которых выполнена нормировка прибрежных метеографических записей, расположены на глубоководных акваториях открытого моря и отмечены на карте крестиками (рис.4.19).

В таблице обобщены результаты численного моделирования морских наводнений на побережье острова Сахалин. Приведенные на карте экстремальные значения колебаний уровня моря соответствуют максимумам за все время проведения вычислительного эксперимента.

Таблица 4.2. Результаты расчета максимальных заплесков и отливов морских наводнение по побережью южной части острова Сахалин, возникающих под воздействием одиночной волны единичной амплитуды

Название	Широта	Долгота	Глубина [м]	6 мин		10 мин		20 мин	
				Прилив	Отлив	Прилив	Отлив	Прилив	Отлив
1. КУРИЛЬСКАЯ КОТЛОВИНА									
мыс Терпения	48,6	144,7	22	1.68	2.0	1.94	1.66	1.73	1.52
ПВО	48,75	144,6	18	2.48	4.0	2.63	4.65	2.1	2.99
ВРМ	49,0	144,4	15	3.37	2.7	3.65	3.34	3.14	2.44
Север	49,25	143,7	16	3.11	2.78	4.35	3.32	2.26	3.03
Поронайск	49,0	143,0	20	2.19	1.89	2.38	2.48	1.98	2.4
Макаров	48,4	142,7	23	2.06	1.47	2.13	1.77	2.26	1.69
Взморье	47,9	142,6	24	1.66	1.52	1.74	1.92	1.73	1.62
Стародубское	47,4	142,8	23	2.09	1.6	2.65	2.14	1.14	1.72
Островысовка	47,2	143,0	29	1.58	1.52	2.1	1.66	2.34	1.33
Охотское	46,8	143,2	11	3.83	3.6	3.7	3.07	2.97	2.63
Свободный	46,8	143,5	46	2.62	1.45	2.63	1.42	2.05	1.24
Левенорна	46,4	143,6	47	2.56	1.89	2.47	1.79	1.82	1.14
2. АНИВСКИЙ ЗАЛИВ									
мыс Анива	46,0	143,4	25	3.2	2.63	3.38	2.22	2.22	1.48
Новиково	46,4	143,3	16	2.45	3.32	2.82	3.33	3.8	2.56
Озерский	46,56	143,2	18	2.22	2.47	2.88	3.2	2.7	3.26
Пригородное	46,58	142,85	22	1.34	1.29	2.04	1.4	1.6	1.97
Корсаков	46,65	142,7	15	1.78	1.49	2.36	1.82	3.1	1.9
г. Анива	46,66	142,5	12	2.15	1.6	2.13	2.04	2.57	3.25
Кириллово	46,45	142,4	21	0.88	1.28	1.38	1.2	1.65	1.46
Крильон	45,8	142,0	32	1.17	0.73	1.32	0.89	1.56	0.78
3. ТАТАРСКИЙ ПРОЛИВ									
Слепиковского	47,33	141,9	15	2.87	2.68	2.6	1.85	1.8	1
Чехов	47,5	141,9	12	2.5	2.37	2.55	2.15	2.84	2.68
Томари	47,8	142,0	12	3.5	2.44	2.95	1.9	3.04	2.16
Ильинский	48,0	142,2	11	3.18	1.87	2.75	2	3.32	2.36
Красногорск	48,4	142,0	12	2.06	1.94	1.95	1.45	2.32	1.4
Ломанон	48,7	141,85	15	1.13	1.19	1.2	0.85	1.08	0.48
Углегорск	48,9	141,98	16	1.87	1.3	2	0.95	1.36	0.72
Шахтерск	49,2	142,0	13	1.3	1.13	1.5		1.52	0.72
Лесогорское	49,4	142,0	13	1	0.63	1	0.6	1.04	0.44
4. МОНЕРОН									
м. Кузнецова	46,0	141,9	20	3.8	2.52	3.44	2.6	3.84	2.68
Шебунино	46,4	141,85	14	2.46	1.46	2.32	1.125	2.45	1.13
Горнозаводск	46,6	141,8	19	1.63	1.29	1.8	1.57	1.36	0.96
Невельск	46,7	141,86	16	1.19	1	1.2	1.03	1.4	0.78
Холмск	47,0	142,0	20	1.48	1.4	1.14	1.52	1.04	1.13
Яблочный	47,2	142,0	11	1.5	1.58	1.37	1.43	1.58	1.27

Подчеркнутые пары значений амплитуд (таблица 4.2) отмечают пункты на побережье, между которыми происходит наиболее интенсивный обмен длинноволновой энергией с заданным периодом, что можно интерпретировать как пары пунктов на побережье, между которыми образуется замкнутый волновой канал, аккумулирующий и усиливающий сейшевые колебания в прибрежной акватории.

Из анализа рисунка 3.19 следует вывод, что вблизи выдающихся в море мысов максимальную опасность представляют волны с малым периодом. При этом вблизи мысов максимальные заплески достигаются при первом вступлении волны, после чего колебания уровня моря быстро стихают.

Результирующие наводнения в вершинах, и особенно на границах заливов могут быть существенно выше, чем полученные в результате проведенных здесь вычислительных экспериментов, что обусловлено как большими глубинами, на которых регистрировались колебания уровня моря в вычислительных экспериментах, так и более длительным энергетическим воздействием на поверхность моря, при прохождении реальных штормовых циклонов. Максимальная волна внутри заливов может быть далеко не первой, а проявиться только по мере возбуждения колебаний уровня моря в прибрежных акваториях с повышенной добротностью к длинноволновым возмущениям.

Характер собственных длинноволновых колебаний уровня моря на открытом побережье и в закрытых акваториях морских заливов

Интенсивность длинноволновых процессов на морском шельфе и вызываемых ими морских наводнений на побережье в существенной степени зависит от гидродинамических условий поддержания стабильности собственных длинноволновых колебаний уровня моря,

проявление которых зависит от геометрических свойств рельефа морского дна на подходах с моря к этому побережью.

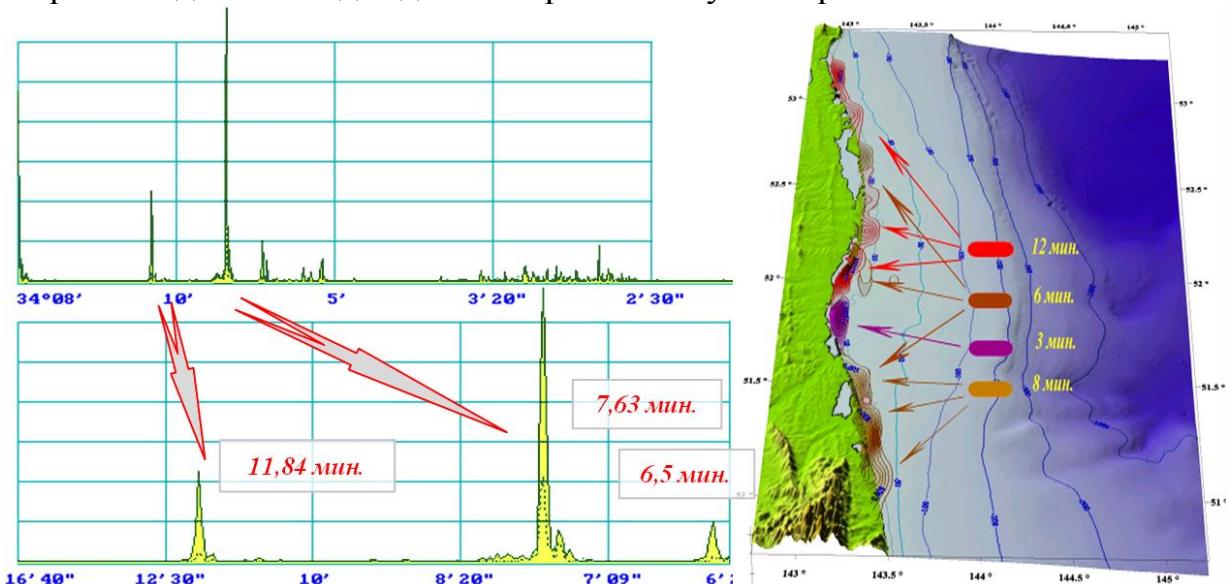


Рис. 5. Сахалинский шельф. Характерные периоды длинных волн, способных длительное время сохраняться или аккумулироваться на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин.

В геометрически сложной акватории всегда присутствуют области со свойствами высокодобротных резонаторов, на которых аккумулируется энергия длинноволновых колебаний уровня моря на строго определенных периодах, определяемых ее топологическими и резонансными свойствами. Если пространственные экстремумы для собственных колебаний уровня моря находятся непосредственно вблизи побережья, то такой берег должен быть признан небезопасный для строительства прибрежных инженерных сооружений. Если же на берег будет выходить узловая линия между пучностями крупных стоячих волн, то у такого участка побережья может быть небезопасным строительство выносных морских причалов или организация якорных стоянок, даже в случае защищенности этих акваторий от прямого воздействия морской зыби и штормовых ветров.

Для оценки потенциальной опасности развития интенсивных собственных колебаний уровня моря и экстремальных течений в Анивском заливе и на северо-восточном шельфе острова Сахалин,

были проведены длительные вычислительные эксперименты для поиска прибрежных и шельфовых длинноволновых резонаторов, проявляющихся в результате воздействия на морскую акваторию единичного длинноволнового импульса с минимально возможным периодом исходной волны.

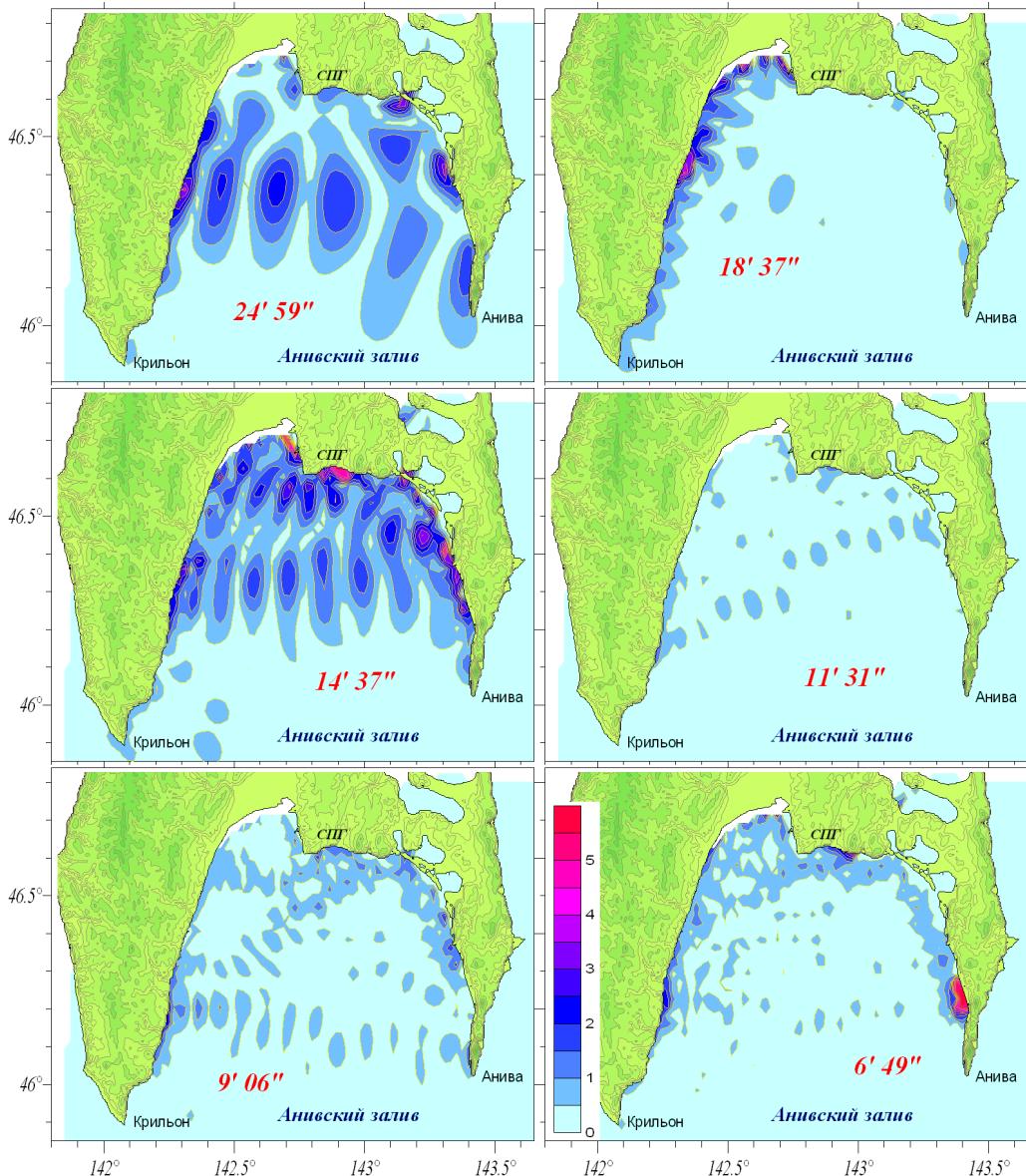


Рис. 6. Залив Анива. Пространственные формы стоячих волн, аккумулирующих длинноволновую энергию на акватории Анивского залива при прохождении штормов, в том числе за счет длинноволновой зыби из удаленных акваторий Охотского моря и Курильских островов. В результате моделирования остаточных длинноволновых колебаний уровня моря, волны с периодами 25, 18,6 14,6 11,5 9 и 6,8 мин на спектральных кривых образуют ярко выраженные энергетические полосы по всему заливу.

Выявленные в результате вычислительного эксперимента аккорды собственных длинноволновых колебаний отражаются во всех точках регистрации уровня моря, равномерно распределенных по всей расчетной области, где каждая из обнаруженных волн имеет характер стоячей волны, и изменяет энергетический уровень относительно других волн внутри аккорда только при изменении пространственного местоположения точек регистрации. Карттирование величины интенсивности энергетических спектров для обнаруженных волн показывает их точную привязку к конкретным локальным участкам морской акватории.

Вблизи этих же участков следует ожидать наиболее активного сгонно-нагонного отклика уровня моря и существенного усиления течений при проявлении любых метеорологических или сейсмических воздействий, в том числе происходящих на большом удалении от острова Сахалин.

Залив Анива является полузамкнутой морской акваторией. Каждый участок побережья залива способен аккумулировать сложные аккорды собственных длинноволновых колебаний уровня моря.

Вычислительные эксперименты, выполненные с использованием подробной батиметрической карты залива Анива с шагом сетки 250 м ([рис. 6](#)), позволили сделать выводы о том, что в целом залив Анива пассивен к длинноволновому воздействию с периодом волн менее 30 минут, и морские наводнения могут возникнуть только при длительном воздействии внешних штормовых источников, любо в результате невероятно мощного цунами. Образующиеся при этом собственные длинноволновые колебания уровня моря в заливе Анива способны перемещаться вдоль побережья в качестве захваченных волн с периодом 6 и более минут. Собственные колебания акваторий, примыкающих к его западному побережью (Кириллово, Анива и возможно бухта Лососей) соответствуют периодам волн 14.5 и

18.5 минут. Акватории, примыкающие к восточному побережью залива, поддерживают колебания порядка 7-9 минут. Вся акватория залива Анива может поддерживать и усиливать колебания с периодом 14.5 и 25 минут.

Моделирование штормового нагона 7-8 ноября 1995 года

Для моделирования взаимодействия атмосферы и океана реализованы алгоритмы, которые допускают использование реальных или прогнозируемых полей атмосферного давления и ветра. Для тестирования этих алгоритмов и математических моделей в действующей версии программы реализовано прохождение модельного циклона по гладкой (сплайновой) траектории.

Границы циклона задаются с помощью «малого круга», очерченного на поверхности сферической Земли. Динамическое взаимодействие океана и атмосферы задается только внутри этого «малого круга», путем плавного изменения давления в зависимости от расстояния до центра циклона. При необходимости может быть задано, также, вихревое поле ветра, спирально сходящееся к центру циклона

По данным Сахалинского УГМС траектория циклона 7-8 ноября 1995 года проходила по акватории Японского моря.

Таблица 4.3. Траектория циклона по данным Сахалинского УГМС.

Дата	Время (ч:м)	Широта (°')	Долгота (°')	Давление (мб)	Диаметр (км)
1995.11.07	18:00	40°00'	138°30'	975	<i>Размер циклона 950 км.</i>
1995.11.08	00:00	46°00'	140°30'	965	
	06:00	47°30'	142°00'	950	
	12:00	48°00'	142°30'	950	<i>Циклон остановился</i>
	18:00	48°00'	142°30'	950	
1995.11.09	00:00	48°30'	144°00'	965	

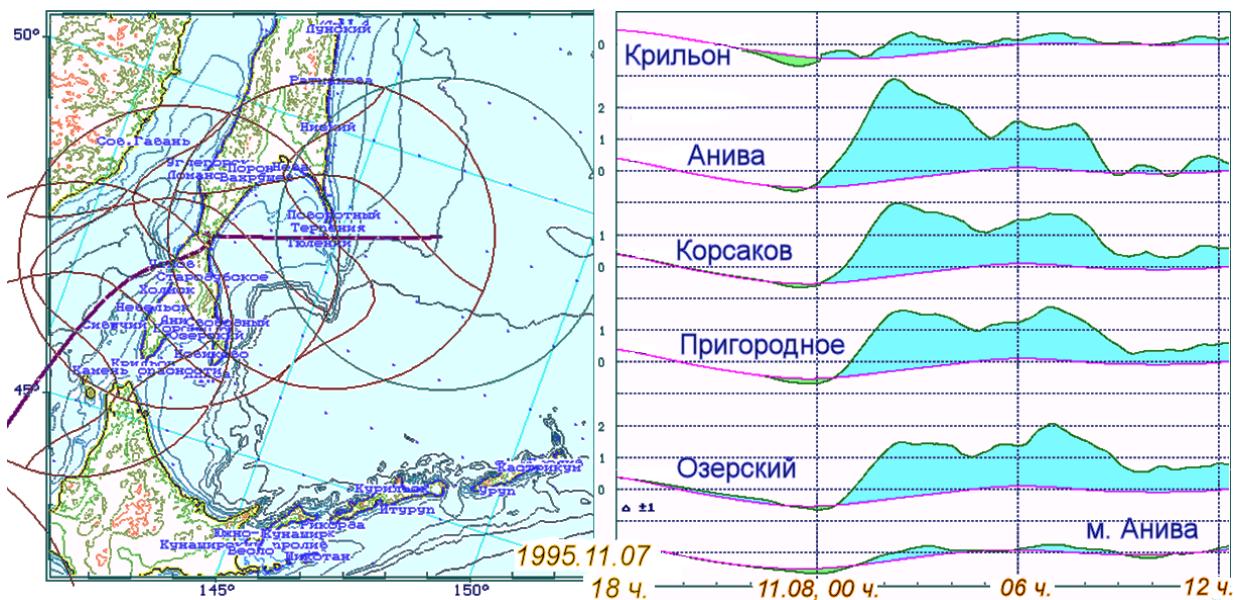


Рис. 4.20. Маршрут циклона 7-8 ноября 1995 года. Пройдя над Японским морем, циклон остановился над Сахалином, что привело к длительному нагонному воздействию юго-западного ветра. Затем, выйдя в Охотское море, циклон рассеялся и прекратил свое существование. Справа показан ход штормового наводнения в основных пунктах залива Анива. Повышение уровня моря вблизи Корсакова около 2,3 м, в акватории вблизи г. Анива – 3,2 м. В расчетах задавалась скорость ветра с экстремальным значением 30 м/с.

Когда циклон приблизился к заливу Анива вечером 7 ноября, то восточным ветром в верхнем крыле циклона был вызван активный сгонный поток через пролив Лаперуза в сторону Японского моря. Лишь только после того, как циклон поднялся выше пролива Лаперуза, то на поверхности Анивского залива образовалось ветровое напряжение (*скорость юго-западного ветра у мыса Крильон – 60 м/с; в Корсакове – 45 м/с*), приведшее к перетоку воды в северную часть залива и образованию там значительного штормового нагона, по которому в город и порт Корсаков стали заплескиваться гребни штормовых волн.

На рис. 4.20 приведен пример построения и проведения вычислительного эксперимента по моделированию морских наводнений, возникших при прохождении глубокого циклона по Татарскому проливу 7-8 ноября 1995 г. Величина гидродинамического нагона в районе порта Пригородное составила величину порядка двух мет-

ров, на фоне которого действовали стоячие длинные волны (сейшевые колебания уровня моря) с периодами от 6 до 25 мин, периодически удваивавшие величину морского наводнения вблизи побережья, и одновременно пропускавшие к береговому урезу и к открытым морским причалам в порту Корсаков крупные волны зыби из открытого моря, которые по большой воде легко достигают возвышенного берегового уреза.

По наблюдениям в г. Корсакове штормовые волны, высотой до 8 метров и минуя портовые сооружения затекала на улицы города (По информации, представляющей Сахалинским УГМС штормовой нагон не превышал 2-х метров). Для получения возможных экстремальный оценок штормового нагона в Анивском заливе, был выполнен дополнительный расчет воздействия циклона проходящего непосредственно через Анивский залив, имеющего относительный перепад давления в центре 50 мб (абс.=950 мб), максимальную скорость ветра 70 узлов и размер около 300 км.

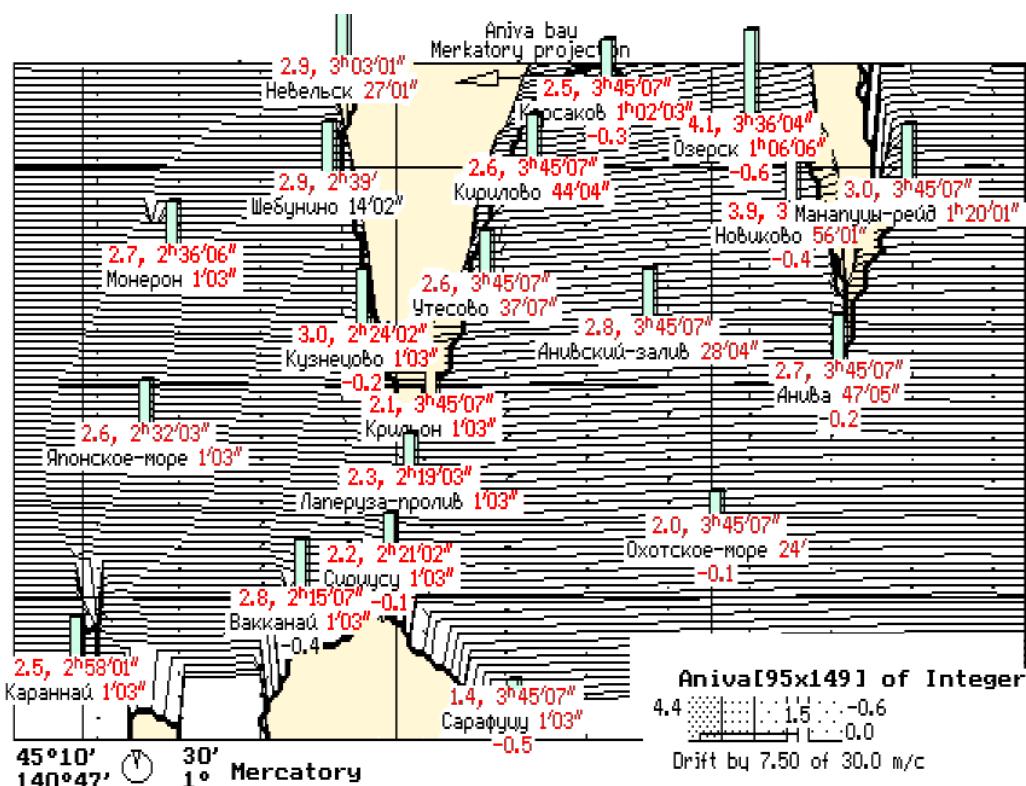


Рис. 4.21. Распределение экстремальных значений уровня моря на период прохождения циклона над Анивским заливом.

Из протокола, полученного в результате вычислительного эксперимента, экстремальные величины штормовых нагонов равны: в Корсакове – 1,27 м; на мысе Крильон – 1,97 м; в Холмске – 3,7 м; в Невельске – 3,5 м; в районе Углегорска – 4,5 м., а также огромные нагоны в Александровске – 7,3 м., Ванино – 4,2 м., Де-Кастри – 7,2 м.

Таблица 4.4. Сводная таблица по пунктам наблюдения:

Atmosphere Cyclone on 3 Basis Points:

.. Day & Time	Geo.Coordinates	Size[km]	P[wat'cm]	Wind[m/c]	Stress
1: 0 0	45°11' 140°48'	300.00	-50.0	35.0	0.002
2: 0 6 ^u	47°36' 144°32'	300.00	-50.0	35.0	0.002
3: 0 12 ^u	49°36' 145°15'	300.00	-50.0	35.0	0.002
Latit Longit	20 Mario Stations	Depth	Initial\Extreme	+Max/-Min Flow	Direction
~~~~~	~~~~~	~~~~~	~~~~~	~~~~~	~~~~~
45°54' 142°06'	Крильон	23	1°03" 4°38'	<b>2.91</b> /0.00	75.71 39°47'
46°38' 142°40'	Корсаков	24	1°02'03" 4°32'05"	<b>3.47</b> /0.28	25.98 -26°54'
46°21' 143°15'	Новиково	51	56'01" 3°33'03"	<b>3.87</b> /0.44	46.27 -7°38'
45°59' 143°24'	Анива	31	47'05" 5°10'01"	<b>2.86</b> /0.16	65.84 68°56'
46°33' 143°07'	Озерск	25	1°06'06" 3°36'04"	<b>4.07</b> /0.56	27.07 -82°23'
46°27' 142°26'	Кирилово	23	44'04" 4°10'03"	<b>3.05</b> /0.04	37.84-154°57'
46°11' 142°17'	Утесово	26	37'07" 4°12'01"	<b>3.00</b> /0.00	32.68 178°14'
46°15' 141°17'	Монерон	70	1'03" 2°36'06"	<b>2.66</b> /0.00	24.14 172°56'
46°04' 141°53'	Кузнецово	35	1'03" 2°24'02"	<b>3.04</b> /0.17	42.69 175°18'
46°41' 141°49'	Невельск	42	27'01" 3°03'01"	<b>2.92</b> /0.09	15.10 159°07'
46°25' 141°47'	Шебунино	71	14'02" 2°39'	<b>2.86</b> /0.09	48.50 165°23'
45°44' 142°02'	Лаперуз-пролив	65	1'03" 4°43'06"	<b>2.97</b> /0.00	144.39 100°51'
45°33' 141°58'	Сириусу	33	1'03" 4°42'04"	<b>3.08</b> /0.14	147.36 103°18'
45°27' 141°42'	Вакканай	25	1'03" 2°15'07"	<b>2.82</b> /0.39	61.56 106°13'
45°13' 142°22'	Сарафуцу	25	1'03" 4°55'03"	<b>3.07</b> /0.50	32.99 -35°13'
45°17' 140°59'	Караннай	97	1'03" 2°58'01"	<b>2.51</b> /0.00	56.19 153°30'
45°50' 141°12'	Японское море	114	1'03" 2°32'03"	<b>2.59</b> /0.00	60.77 127°54'
46°05' 142°48'	Анивский-залив	88	28'04" 3°57'04"	<b>2.85</b> /0.08	53.28 35°07'
46°24' 143°37'	Манапуцы-рейд	52	1°20'01" 4°25'01"	<b>3.46</b> /0.04	58.16 -14°29'
45°37' 143°01'	Охотское море	112	24' 4°54'	<b>2.89</b> /0.12	55.98 125°02'

Последний вариант расчета показал экстремальный уровень штормового нагона в Корсакове 3,5 м., Озерске 4,1 м. По данным сводной таблицы, на глубинах 20 и более метров, максимальные скорости нагонных течений находятся в пределах 1-3 м/с (2-6 узлов)

Ураганным ветром и волнением в порту Корсаков были уничтожены 3 портальных крана и значительно повреждены остальные 15 портальных кранов. 11 железнодорожных вагона отброшены на 20-30 м. Повреждено и размыто железнодорожное полотно на протяжении 400 м. Разрушено покрытие пирсов, повреждены гидroteхнические сооружения, испорчен и разбросан груз, находящийся на пирсах.

Потерпели крушения следующие морские суда: шхуна «Одисей-2», получившее ранее пробоину, и катер «Рейдовый» затонули в ковше порта Корсаков; судно «Яков Синяков» затонуло у пирса; плашкоут СУ-26 выбросило на пирс; теплоход «Комета» получил пробоину; сели на мель в районе 1-ой Пади залива Анива судно «Триас», зверобойные шхуны «Серебрянка» и «Зверево», гондурасская шхуна «Кармитозе» и у поселка Песчанское сел на мель танкер «Филатов».

При моделировании штормовых нагонов удовлетворительные результаты получаются на открытых берегах. В регионах с большими мелководными участками, в частности, в Татарском проливе всегда возникают огромные штормовые нагоны при любом циклоне, пересекающем северную часть Японского моря. Можно сделать вывод, что реализованная вычислительная модель корректно работает с атмосферным давлением, однако нуждается в доработке алгоритмов для моделирования воздействия приводного ветра.

Результаты численного моделирования воздействия атмосферных циклонов на акваторию Анивского залива можно признать вполне удовлетворительными. Упреждающее проведение таких вычислительных экспериментов, которые могут быть построены, в том числе, по данным типовых штормовых прогнозов, необходимо признать обязательным для всех портовых служб Сахалинской области.

## **Моделирование штормовых нагонов на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин**

В процессе моделирования прохождения циклона 8 ноября 1995 года над полуостровом Терпения, было обнаружено зарождение интенсивной шельфовой волны, движущейся вдоль восточного Сахалинского шельфа на север.

Для оценки отклика северо-восточного шельфа острова Сахалин сначала был использован гипотетический циклон с перепадом давления в центре порядка 50 мб и скоростью ветра 30 м/с.

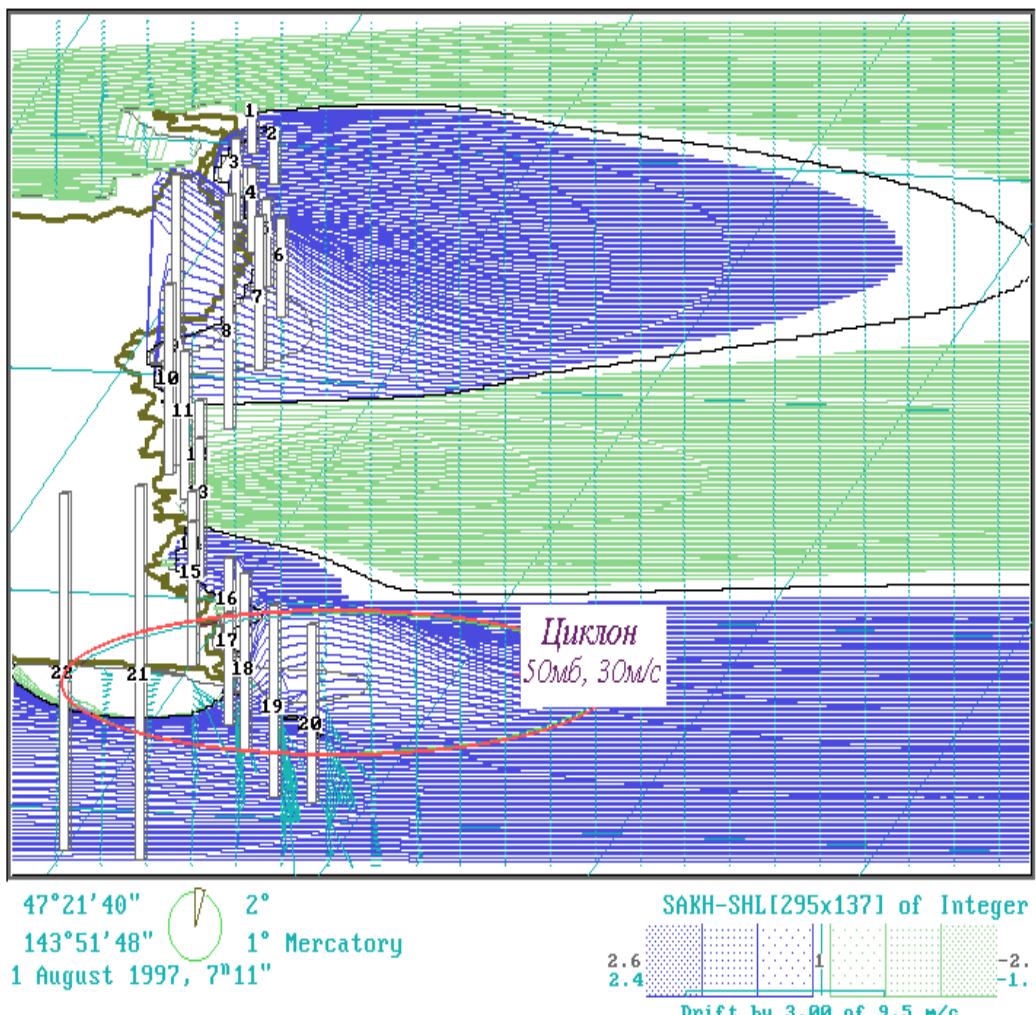


Рис. 4.22. Изображение на экране ЭВМ в процессе численного моделирования прохождения циклона вдоль Сахалинского шельфа. Столбиками обозначены экстремальные уровни моря в 22 постах наблюдения, стрелки показывают мгновенное поле течений. В нижней левой части экрана приведена масштабная шкала и экстремальные значения уровня моря и течения для всей расчетной области.

С первых же шагов вычислительного эксперимента было обнаружено образование захваченной длинной волны, которая двигалась на север по сахалинскому шельфу со значительным опережением атмосферного циклона. Механизм образования такого опережающего штормового нагона обусловлен захватом в волновой процесс свала глубин Курильской котловины. Вдоль свала глубин волновая энергия на большой скорости была перенаправлена на север и затем сфокусирована в районе лагуны Чайво. Такое «атмосферное» или «метео-циунами», с большой скоростью достигшее восточных акваторий сахалинского шельфа, по высоте оказалось впятеро больше гидростатического подъема уровня моря, который к этому времени удерживался в районе мыса Терпения.

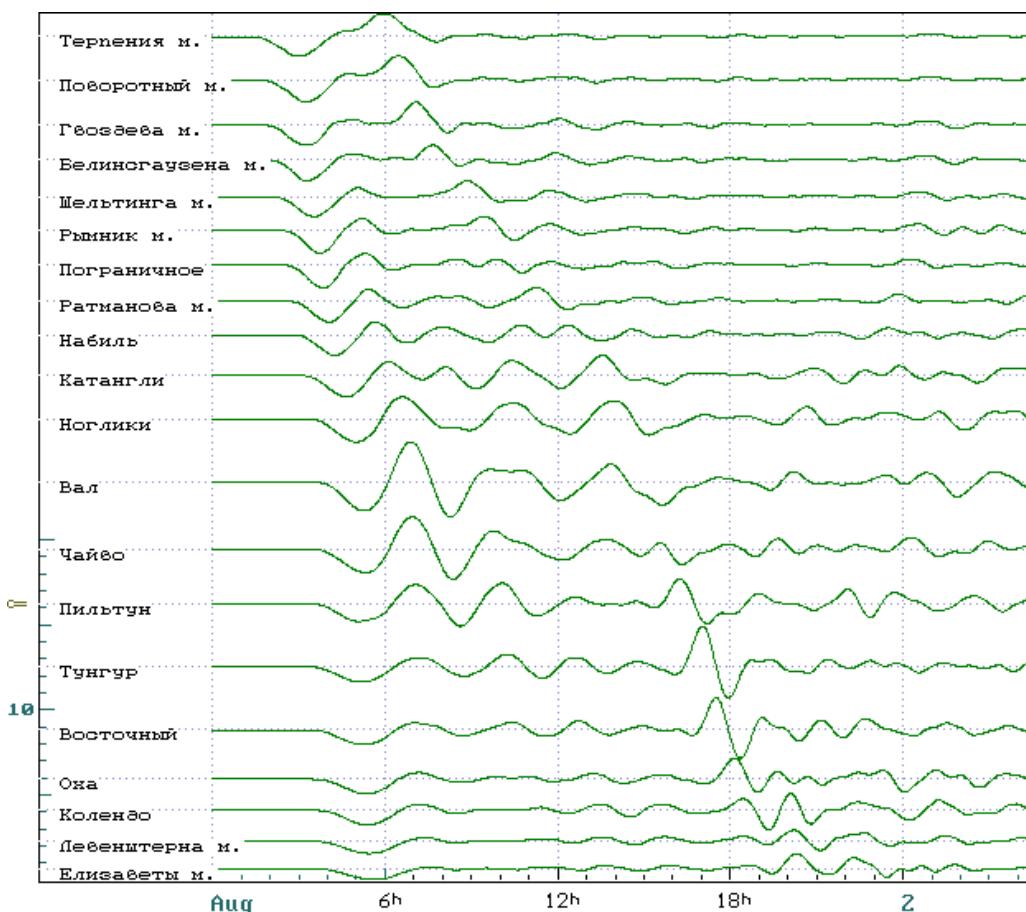


Рис. 4.23. Записи хода уровня моря, полученные при моделировании циклона, проходящего вдоль Сахалинского шельфа.

На рисунках 4.22 и 4.23 показано образование значительно более высокой захваченной шельфовой волны, которая движется на север вдоль Сахалинского побережья со значительным опережением атмосферного циклона. После того как циклон приблизился к полуострову Терпения, на север Сахалина стала распространяться волна «атмосферного цунами» со скоростью распространения сейшевой волны. При этом отраженная от полуострова волна оказалась больше, чем последующее прямое воздействие циклона на северную часть Сахалинского шельфа.

Использованный при моделировании циклон вызвал наводнение в пять раз превышающее перепад давления в центре циклона. Опасность такой волны состоит в появлении высокоскоростных течений вдоль Сахалинского шельфа, которое в приведенном примере достигает 10 м/с (около 20 узлов). Если такие процессы будут происходить в зимнее время, то ледовые подвижки будут представлять чрезвычайную опасность для любых морских и прибрежных инженерных сооружений, которые могут быть размыты подледными течениями или разрушены ледовыми торосами.

### *Гипотетическое цунами от катастрофического землетрясения с охотоморской стороны от Северных Курил*

В качестве источника цунами выбран макросейсмический очаг землетрясения с магнитудой  $M_s = 8,5$ , сопоставимый по энергии с чилийским цунами 1960 года. Такое цунами может возникнуть в результате взрыва активных подводных вулканов, расположенных в Охотском море в районе Северных Курильских островов.

Высота цунами в источнике составляет 2,6 м, размер макросейсмического очага: 136x418 км. Глубина моря в области землетрясения 1000 м, что соответствует длинноволновому очагу цунами с периодом 22 мин.

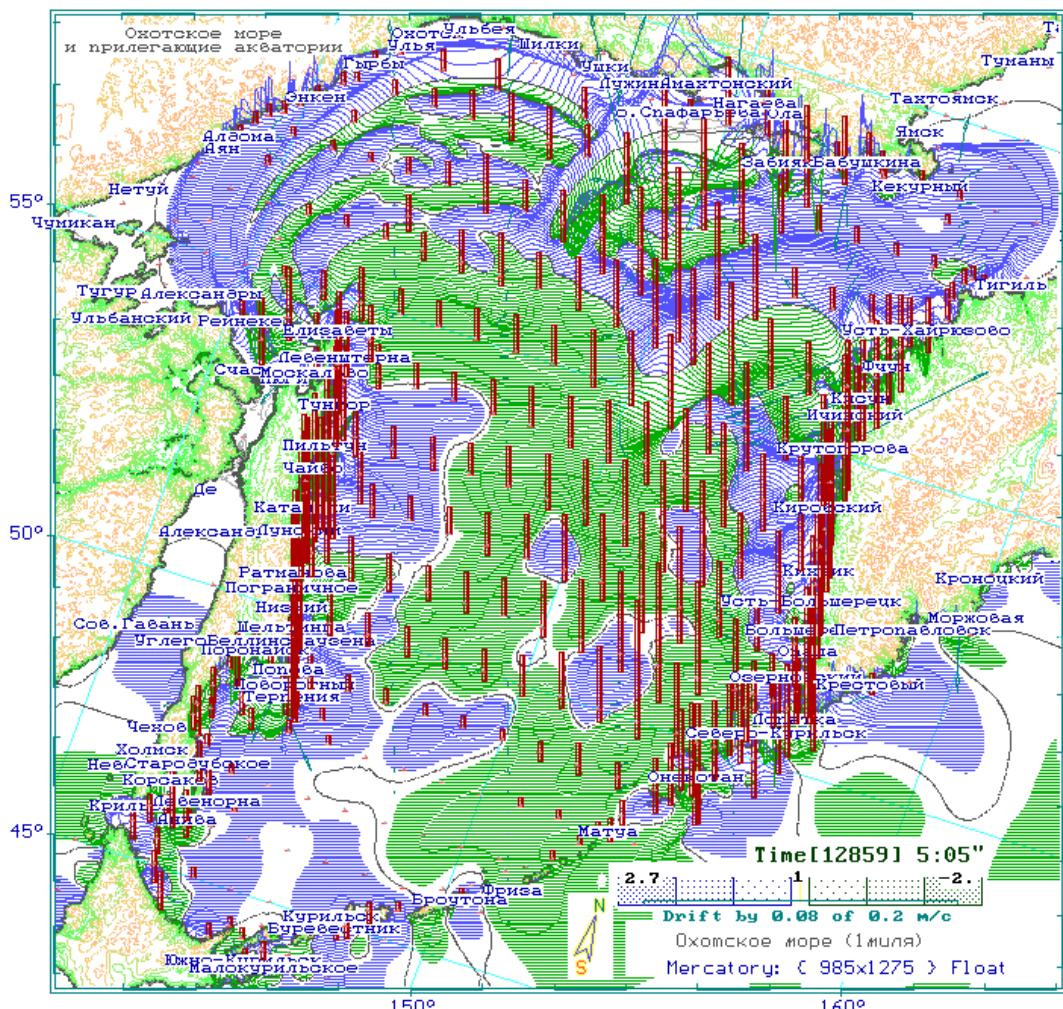


Рис.4.24. Через 5 часов волна цунами достигает Магадана. Столбиками на карте отмечены максимальные и минимальные высоты волн, прошедшие через конкретные точки в открытом море и вблизи побережья. Пространственная картина волновой поверхности моря прорисована горизонтальными профлиями, на которой белыми полями выделены поверхности, в которых в данный момент времени уровень моря изменился менее чем на 10 см. Справа-внизу приведена масштабная шкала для колебаний уровня моря и скоростей течений, на которой отмечены максимальные величины по уровню не превышающие 2,7 м, и скорости течений не более 0,2 м/с, как максимальных значений в одной из точек для всей расчетной области, охватывающей Охотское море, Татарский пролив и прилегающие акватории Тихого океана.

Основная энергия цунами от катастрофического землетрясения на Северных Курилах перенаправляется на север Охотского моря (рис. 4.24), что обусловлено рельефом морского дна и лучевыми каналами распространения первого фронта длинных волн в прилегающей акватории. При распространении цунами в сторону Магадана, высота фронта волны постоянно растет, усиливаясь за счет обратно-

го искривления изохрон и схождения лучевых трубок. А следом, к этому же побережью будут устремляться волны, отраженные от сахалинского шельфа и западного побережья Камчатки.

В результате столь сильного землетрясения в глубоководной северной части Охотского моря образуются волны цунами с высотой около 2 м., которые способны привести к катастрофическим последствиям вблизи побережья Магаданской области, с заплесками на побережье более 10 м. В то же время, высота первого вступления волн цунами на северо-восточном шельфе Сахалина не прогнозируется более чем 3-3,5 м; в заливе Анива 2 м.

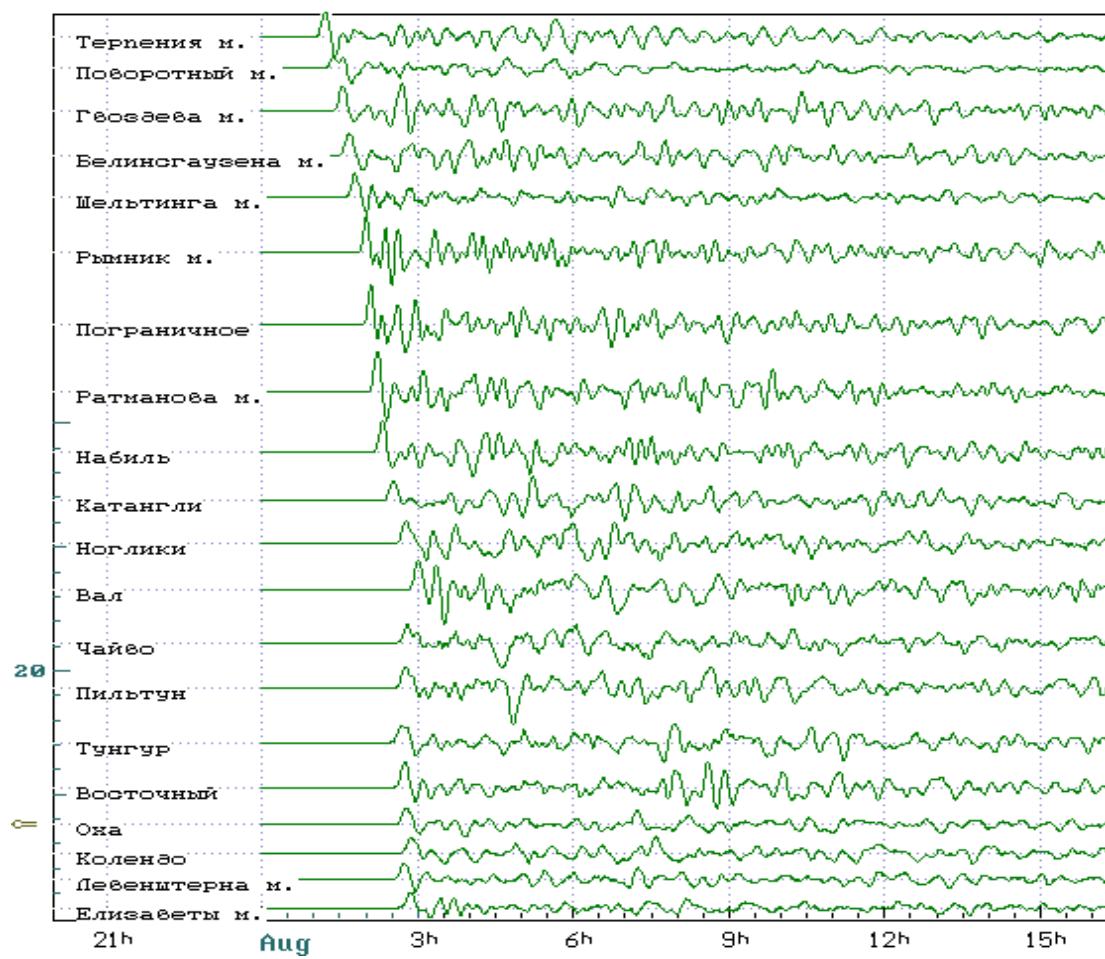


Рис. 4.25. Проявление волны цунами, движущейся к восточному побережью Сахалина со стороны Курильских островов. При прохождении из Тихого океана амплитуда прогрессивной волны составляла ориентировочно 0,5 м.

Следует сделать выводы, что амплитуда волны цунами в районе Сахалинского шельфа усиливается, по крайней мере, в шесть раз, и

возбуждает относительно более длительные во времени колебания уровня моря, чем аналогичное длинноволновое «атмосферное цунами» (в приведенном расчете период волны цунами около 12 минут).

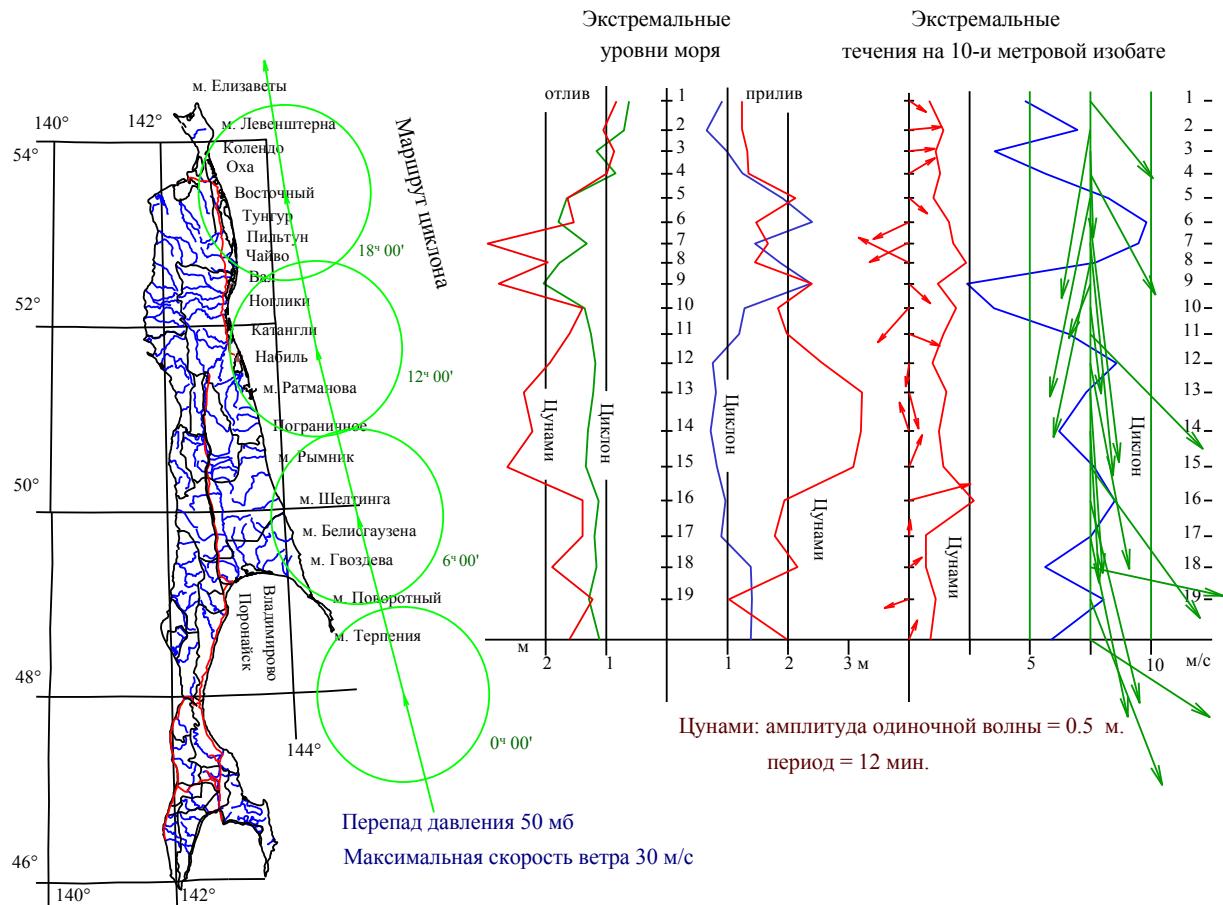


Рис. 4.26. Результаты численного моделирования длинноволновых процессов на Сахалинском шельфе, где в качестве источников возмущения задавался быстродвижущийся циклон и одиночная волна цунами, движущаяся со стороны пролива Фриза.

На рисунке 4.26 показаны обобщенные результаты численного моделирования штормовых нагонов и цунами для прибрежных районов Сахалинского шельфа. Результаты моделирования могут быть использованы для быстрой оценки опасности наводнений, путем сопоставления результатов измерения в удаленных точках с данными прогнозного моделирования по защищаемым участкам побережья.

## *Оценка результатов вычислительных экспериментов и реальных наблюдений с борта судна в открытом море*

Для оценки резонансных свойств прибрежных акваторий использовались отрезки метеографных записей, начинающиеся через трое суток физического времени после начала вычислительного эксперимента, т.е. после прохождения 720 циклов свободных колебаний исходной возмущающей волны с периодом 6 минут. Длины метеографных рядов, использованных при спектральном анализе, составляли 16 000 чисел, что соответствует периоду времени 26 часов 40 минут (рис. 4.26). При расчете спектральных кривых использовалось усредняющее окно, длиной 2048 чисел, что определяло максимальный период оцениваемой волны не более 3 часов 24 минут.

### ***Залив Терпения.***

Численный анализ длинноволновых процессов в заливе Терпения показывает, что высокочастотные резонансные колебания с периодами менее 6 минут поддерживаются только в заливе Мордвинова, что подтверждается ярко выраженными пиками на спектрограммах пункта Охотское. Это означает также, что штормовое усиление сейшевых колебаний уровня моря и связанные с ними морские наводнения и экстремальные прибрежные течения в заливе Терпения наиболее активно проявляются только вблизи поселка Охотское.

По другим пунктам на побережье залива Терпения во всем диапазоне от 6 до 30 мин резонансных колебаний уровня моря практически не наблюдается. Последнее означает, что штормовые процессы над заливом Терпения, которые активно порождают прибрежные захваченные волны и сейшевые колебания уровня моря с периодами порядка 3÷5 минут, не поддерживаются резонансными участками акваторий вблизи побережья, не обеспечиваются добротными волноводами, а также являются пассивными как для притока энергии

извне залива Терпения, так и из опасного участка акватории в районе залива Мордвинова.

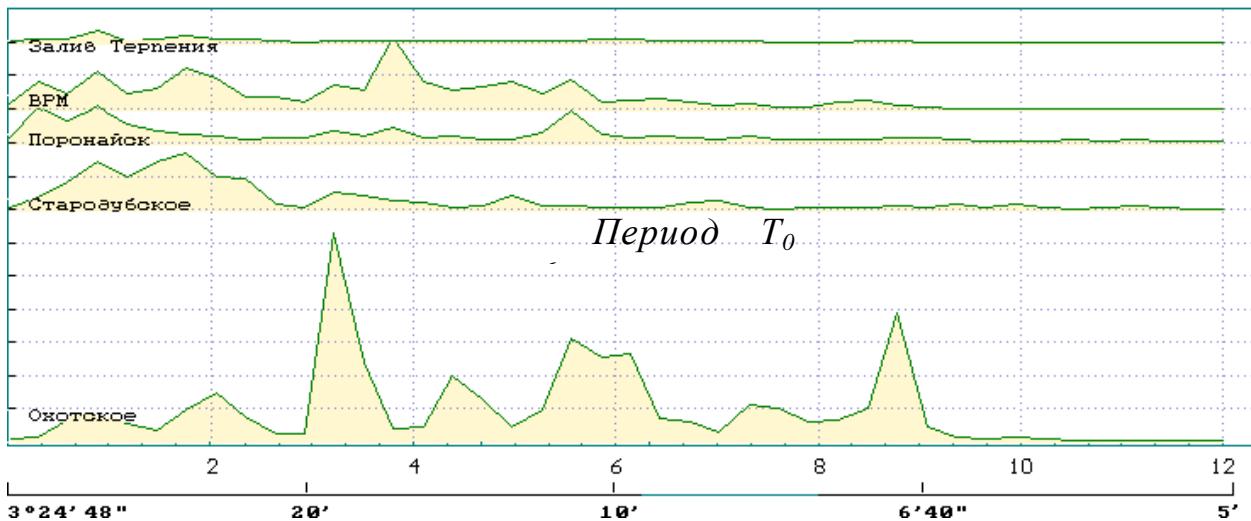


Рис. 4.26. Распределение спектральной энергии длинноволновых резонансных колебаний уровня моря в различных пунктах вдоль побережья залива Терпения, вызванных одиночным импульсом с периодом 6 минут. Высокочастотная энергия начального импульса нашла резонансный отклик только в заливе Мордвинова, что отразилось на спектрограмме вблизи пункта Охотское. Во всех других пунктах резонансный отклик обнаружен только для колебаний уровня моря с существенно большими периодами. Общий для всех пунктов длинноволновой резонанс можно отметить только для периода волн порядка 34 минут, который нельзя назвать ярко выраженным.

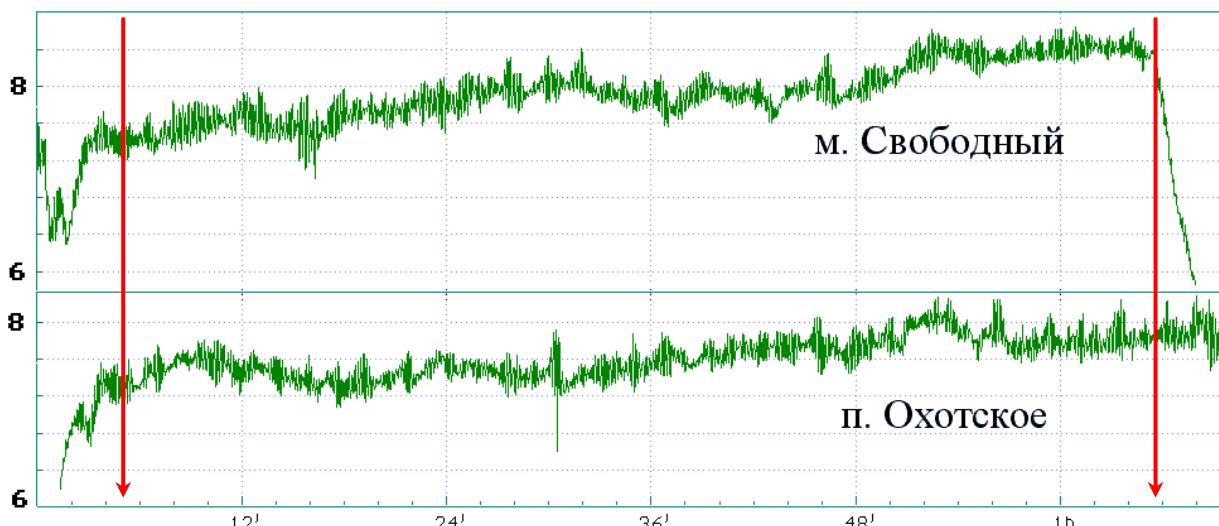


Рис. 4.27. Запись скорости судна на переходе между океанографическими станциями в заливе Мордвинова. На вертикальной шкале приведена абсолютная скорость судна в узлах, на горизонтальной – время в минутах. Нижняя запись относится к п. Охотское, верхняя – к м. Свободный. Вертикальными стрелками отмечен интервал записи длительностью 1 час, включаемый в спектральную обработку

С помощью приемника GPS получены ежесекундные записи скорости хода судна многочасовой длительности, которые обладают довольно высокой точностью. В заливе Терпения судно не испытывало заметных изменений скорости хода с периодичностью менее 1 минуты, что свидетельствовало об удаленности от побережья, где происходит длинноволновая трансформация зыби. Пульсации скорости течений более 10 минут также отфильтровывались, что связано с необходимостью единообразной спектральной обработки цифровых рядов, минимальные из которых составляли длительность всего немногим более одного часа (рис. 4.27).

Таким образом, по результатам комплекса измерений наилучшим параметром для оценки гидродинамики морских вод явилось измерение скорости хода судна на переходе между океанографическими станциями. В частности, в акваториях с высокой гидродинамической активностью наблюдались довольно большие изменения скорости хода судна. В заливе Мордвинова пульсации скорости составляли 0.4 узла, а максимальные перепады скорости хода судна достигали 0.6 узлов.

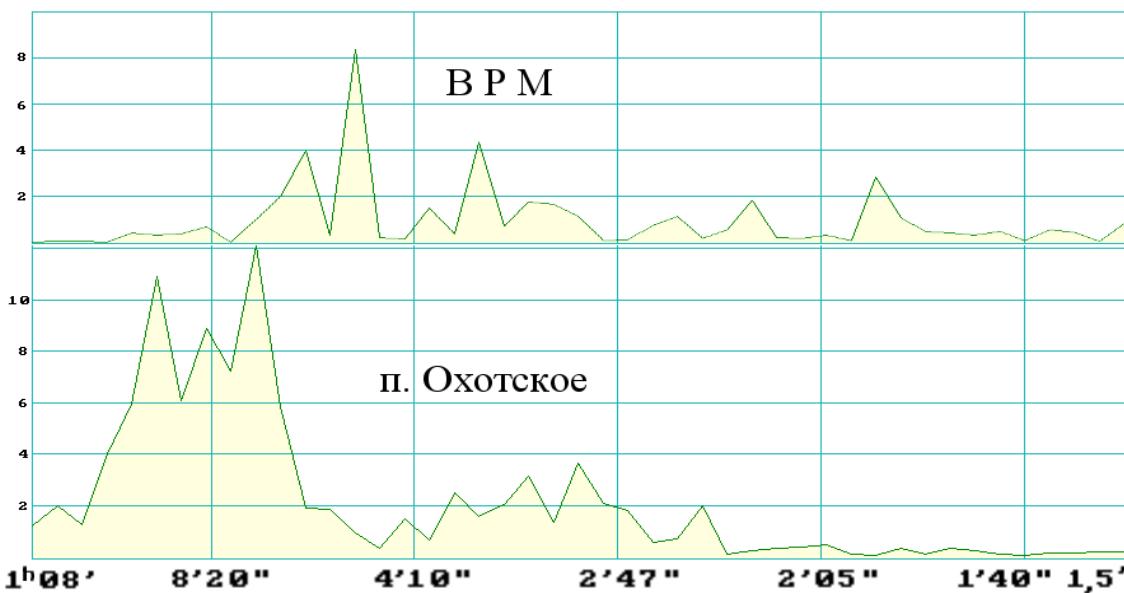


Рис. 4.28. Спектограммы пульсаций скорости хода экспедиционного судна на переходе между океанографическими станциями вблизи врачающегося радиомаяка «м.Терпения» (ВРМ, вверху) и вблизи пункта Охотское в заливе Мордвинова (внизу).

Наблюдения за пульсациями скорости судна, которые должны зависеть от изменения скорости сейшевых течений на маршруте движения экспедиционного судна, хорошо подтверждают высокую гидродинамическую активность вблизи пункта Охотское. На спектрограмме видны довольно интенсивные колебания на периодах порядка 3 минут, основные же пики приходятся на периоды порядка 7 и 10 минут, что вполне соответствует результатам численного моделирования длинноволновых колебаний уровня моря в акватории залива Мордвинова.

В районе порта Поронайск, ни на переходах вдоль побережья, ни во время штормовых отстоев под прикрытием берега, интенсивных колебаний уровня моря или экстремально сильных течений не обнаружено. Общий уровень динамических проявлений на поверхности моря здесь существенно ниже, чем в заливе Мордвинова, даже несмотря на то, что измерения проводились на переходе, сразу же после затяжного штormа.

Вычислительные эксперименты показали, что длинноволновые резонансные колебания с периодами более 10 мин могут наблюдаться в северной части залива Терпения, однако они возникают не у побережья, а на открытой акватории залива. Интенсивность прибрежных сейшевых волн в северной части залива Терпения определяется как бы вынужденными колебаниями, главный резонансный источник которых располагается в районе залива Мордвинова.

Экспедиционные наблюдения за колебаниями уровня моря и поверхностными течениями в целом подтвердили выводы о слабом гидродинамическом отклике залива Терпения на штормовые процессы. Сравнение длинноволновых пульсаций, полученных путем реальных измерений с борта экспедиционного судна и в результате вычислительных экспериментов, дают качественно идентичные результаты, подтверждающие корректность проведения вычислитель-

ных экспериментов по выявлению собственных длинноволновых колебаний уровня моря в прибрежных акваториях.

Однако, для длинных волн с периодом более 30 минут, залив Терпения может откликнуться очень разрушительными наводнениями и интенсивными прибрежными течениями. Источниками таких возмущений могут стать быстровдвижущиеся над мелководными акваториями тропические тайфуны, или волны цунами, распространяющиеся от дальних подводных землетрясений. Большие наводнения по всему побережью з-ва Терпения могут являться следствием длительных штормов, действующих на акваторию залива Мордвино-ва.

### ***Выводы.***

Штормовые наводнения являются существенно более опасными морскими явлениями, способными поднять суммарный уровень моря на высоту более 5 м под воздействием барических градиентов атмосферного давления, ветровых напряжений на поверхности акватории залива, дополненных интенсивными прибрежными длинноволновыми колебаниями уровня моря (длиннопериодной зыбью). В этом случае к берегу открывается доступ штормовым волнам, высота которых на открытых акваториях Анивского залива может достигать 8 м. Суммарное воздействие штормовых наводнений и штормовых волн и зыби представляет наибольшую опасность для всех инженерных сооружений и населенных пунктов как в северной части Анивского залива, так и в районе нефтегазопромыслов на сахалинском северо-восточном шельфе.

Исторические наблюдения за проявлениями цунами и численное моделирование воздействия волн от катастрофических очагов подводных землетрясений, не подтверждают возможности появления столь же больших морских наводнений от цунами волн. Макси-

мальная высота заплесков на побережье от цунами оценивается не выше чем 2 м в Анивском заливе, и 3 м – на сахалинском побережье северо-восточном шельфа.

По результатам моделирования длительного воздействия градиентов давления атмосферы и штормового ветра 7-8 ноября 1995 г. в полной мере подтверждается возможность возникновения катастрофических наводнений в Анивском заливе. В результате указанного синоптического события в порту Корсаков были уничтожены 3 портальных крана и повреждены остальные 15; разрушены сотни метров железнодорожных путей и 11 вагонов; получили пробоины и затонули в порту 5 судов и 5 судов выброшены на мель в заливе Анива. Возможность больших нагонов на северо-восточном шельфе Сахалина подтверждают сообщения В. Красавцева из Экологической компании Сахалина (ЭКС) о том, что в этих районах весной 2003 г. были обнаружены выбросы плавника на значительной высоте над урезом: у м. Терпения, м. Беллинсгаузена – 7 м.; у п. Пограничное – 7.5 м; у зал. Лунский – 3.5 м; у зал. Чайво – 2.5 м.

Вычислительные эксперименты, поставленные в режиме реального времени с использованием телеметрических исходных данных от морских гидрофизических постов наблюдения, позволяют с достаточной заблаговременностью предупредить гидротехнические объекты в заливе Анива и нефтегазовый флот о грозящей опасности, и затем обосновать время окончания опасного явления. Установка группы телеметрических комплексов для регистрации динамики моря и атмосферы, значительно повысит качество проведения таких вычислительных экспериментов, что очень важно для надежного функционирования морских служб, отвечающих за предотвращение аварий и катастроф на море, в том числе экологических для охото-морских акваторий России и Японии.

## Общее заключение

Высокая штормовая и сейсмическая активность в морских акваториях Сахалинской области, особенно вблизи Курильских островов, требует постоянного контроля состояния моря и оценки процессов взаимодействия атмосферы и океана, нацеленных на выработку заблаговременных прогнозов опасных морских явлений, недопущение материальных потерь и человеческих жертв среди населения, проживающего на морском побережье.

Изучение природы опасных морских явлений и поиск технических решений для контроля динамики цунами и штормовых нагонов, в основе которых лежат глубокие исследования физики и гидродинамики столь грозных явлений природы, ориентированы на комплексное решение задачи о минимизации ущерба от морских катастроф природного и техногенного характера; защиты от штормов и наводнений прибрежной инфраструктуры, в том числе на этапах ее проектирования; обеспечения безопасности мореплавания на каботажных и дальних морских коммуникациях.

В качестве важнейшего звена в системе наблюдения за обстановкой на море должны стать гидродинамические вычислительные эксперименты, в которых моделирование длинноволновых процессов в прибрежной зоне океана в полной мере опробовано и готово к внедрению в действующие службы и режимные отделы Сахалинского и других дальневосточных Управлений по гидрометеослужбе и мониторингу окружающей среды.

Современный уровень развития информационно-измерительной техники, систем электронной связи и телеметрического контроля позволяет решать множество традиционных задач существенно новыми методами, а некоторые технологически неразрешимые исследовательские задачи прошлых лет получили совершенные инстру-

ментальные средства. Несомненно, что к таким инструментам можно отнести как вычислительные эксперименты в гидромеханике, выполняемые на персональных компьютерах, так и новые средства измерения и доставки телеметрической информации, способные эффективно работать по каналам интернет и электронной почты.

На пути решения поставленных задач, основным результатом диссертационных исследований стало создание теоретических основ для построения эффективных вычислительных экспериментов в длинноволновой гидродинамике океана, приведших к реализации новых информационно-вычислительных комплексов для использования в морских гидротехнических изысканиях; в регламенте оперативной работы центров предупреждения об опасных явлениях на море; для информационной поддержки служб мореплавания и спасения человеческой жизни на море.

Основные результаты выполненных исследований сводятся к следующим.

1. Созданы теоретические основы оптимального проектирования и эффективной реализации гидродинамических вычислительных экспериментов, адаптированных к особенностям аппаратной и системной организации современных цифровых дискретных ЭВМ.

1.1. Определены математические, логические и алгоритмические закономерности построения вычислительных экспериментов для решения прикладных задач механики сплошных сред, что позволило создать схемы построения сложных программных комплексов как на пути проектирования «снизу-вверх» - от имеющихся программных наработок к решению большого круга прикладных задач, так и на пути «сверху-вниз» - от обобщенной постановки прикладной задачи к реализации специализированной программной среды, наилучшим образом адаптированной для искомой задачи.

1.2. Создан специализированный математический аппарат трехмерной тензорной гидромеханики, приводящий к созданию вычислительных экспериментов для решения широкого круга прикладных задач механики сплошных сред. Проработаны методы прямого алгоритмического представления новых численных схем на современных цифровых дискретных ЭВМ, в том числе допускающих распараллизование вычислительных операций вплоть до каждого из элементарных вычислительных объектов.

1.3. Реализована специализированная среда программирования для постановки и реализации вычислительных экспериментов при решении широкого круга задач длинноволновой гидродинамики океана и его прибрежной зоны. В алгоритмической плоскости новой среды представлены математические модели с предельной скоростью исполнения, в функциональной – операции по автоматической обработке и визуализации гидродинамических полей на батиметрических картах в произвольно ориентированных меркаторских проекциях.

2. Разработан и запущен в практическое использование новый комплекс программных модулей, предназначенных для постановки и проведения прямых вычислительных экспериментов по моделированию длинноволновых процессов в океане и его прибрежной зоне.

Основной программный модуль “Ani” позволяет в графическом виде готовить батиметрические материалы, анализировать начальные и граничные условия, а также обеспечивать непрерывный визуальный контроль и управление всеми процессами численного моделирования. В ходе вычислительного эксперимента возможно изменение свойств жидкости, динамическая переинтерполяция или подмена батиметрических карт, установка произвольных внешних возмущений уровня моря и скорости течений, вызванных подводными

землетрясениями, атмосферными циклонами и тайфунами, силами астрономической природы и внешними приливными воздействиями.

В состав комплекса вошли дополнительные программные модули, позволяющие обрабатывать большие батиметрические массивы (Three, Tv) и другие исходные данные (World, SpecrM), необходимые для проведения вычислительных экспериментов в длинноволновой динамике океана. Программный модуль “Mario” позволяет в наглядной форме проанализировать результаты расчетов, подготовить базы данных по приливным гармоническим постоянным, сопоставить результаты вычислительных экспериментов и метеографных наблюдений за динамикой уровня моря.

3. Созданы и отработаны типовые вычислительные эксперименты, позволяющие решать комплекс инженерных задач по обследованию гидродинамического и волнового режима в открытых морских акваториях, шельфовой зоне, бухтах и гаванях портов. Обоснованы и опробованы типовые сценарии использования гидродинамических вычислительных экспериментов в оперативной работе морских служб и центров оповещения о морских наводнениях и цунами.

В заключительной главе диссертации приведены типовые методы решения гидродинамических задач с использованием вычислительных экспериментов и реальных данных о состоянии моря и атмосферы.

- Методы использования информационных систем для подготовки батиметрических материалов, допускающих все виды редактирования карт, в том числе непосредственно в процессе проведения гидродинамических вычислительных экспериментов:

- Проведение всех видов быстрых кинематических расчетов, необходимых для оценки времен и интенсивности распространения длинных волн по картинам их лучей и фронтов; для одного или множества пунктов наблюдения, для произвольного по времени

включения длинноволновых источников, с возможностью анализа разностей времен подхода волновых фронтов, с использованием специальной интерактивной системы для графического анализа результатов моделирования.

- Разработан метод оперативной оценки динамики уровня моря при прохождении атмосферных циклонов. Численное моделирование прохождения глубокого циклона вдоль северо-восточного шельфа о-ва Сахалин подтвердило, что штормовые нагоны могут быть соизмеримы с цунами по размаху колебаний уровня моря, а экстремальные течения вблизи побережья могут быть существенно большими.

- Разработана методика моделирования собственных длинноволновых колебаний уровня для больших морских акваторий. Вычислительный эксперимент на выявление внутренних длинноволновых колебаний в Охотском море, подтвердил существование больших приливных колебаний уровня в Пенжинском заливе и в районе Шантарских о-вов, природа которых объяснилась существованием близких к астрономическим собственных суточных и полусуточных колебаний уровня моря. Важным результатом стало обнаружение факта, что форма собственных колебаний уровня моря совпала с распределениями амплитуд приливной волны в Охотском море на близких периодах волн.

- В результате изучения особенностей влияния схемной (числовой) вязкости и придонного трения на пространственную форму вынужденной полусуточной приливной волны  $M_2$ , нагнетаемой в Охотское море через Курильские проливы, был поставлен успешный вычислительный эксперимент, приведший к полному восстановлению приливного режима в Охотском море численными методами. Полученный метод установления хода прилива может быть использован для непрерывного контроля режима течений и хода уровня

моря в любой точке на открытых акваториях и вблизи побережья Охотского моря;

- Отработана методика оперативного моделирования штормовых нагонов и цунами на мелководных акваториях Южных Курильских островов. Результаты численного моделирования нашли удовлетворительное подтверждение экспедиционными наблюдениями проявлений цунами в октябре 1994 года, которые выполнялись уже после представления результатов численного моделирования этого же цунами. В качестве начального возмущения уровня моря использовались параметры циклона, прошедшего за неделю до цунами 4 октября 1994 года, а также параметры источника цунами по макросейсмической модели А.П. Поплавского [1997], и по оперативным данным из Японии, предоставленным по факсу во время проведения тревоги цунами на Юно-Сахалинскую сейсмостанцию.

- Разработана методика районирования побережья по проявлениям волны цунами с разными параметрами подходящей к побережью волны, учитывающая как опасность первого фронта волны цунами, так и возможность длинноволнового возбуждения частично замкнутых прибрежных акваторий. По результатам систематических вычислительных экспериментов для побережья южной части о-ва Сахалин, сделаны выводы об обоснованности новой схемы районирования, как соответствующей наблюдениям за длинноволновым фоном в прибрежных акваториях Сахалина, измеренного с борта экспедиционного судна, а также отмечавшегося на побережье при прохождении глубокого циклона 7 ноября 1995 года.

- Создана и опробована на практике методика регистрации длинноволновых процессов с борта экспедиционного судна в открытом море. Проведенная регистрация длинноволнового фона на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин, в заливах Терпения и Анива, а также вдоль всего побережья Сахалина в Татарском проливе, под-

твердила качественное соответствие результатов численного моделирования и натурных наблюдений за длинноволновыми процессами по маршруту движения экспедиционного судна.

- Создана и реализована на практике комплексная методика гидротехнического обследования акватории Холмского морского торгового порта, позволившая сделать обоснованные технические предложения по реконструкции порта для улучшения волнового режима и штормовой защищенности операционных акваторий порта. В реализации исследований активно использовались вычислительные эксперименты, длительные и высокоточные наблюдения за ходом уровня моря на Холмском метеографе, а также цифровые записи штормового волнения в непосредственной близости от метеографа;

- Разработаны и опробованы комплексные методики контроля длинноволновой динамики и штормового волнения в открытом море и вблизи побережья, в основе которой лежат прямые вычислительные эксперименты, прибрежные метеографные наблюдения и регистрация волнения с борта судов, находящихся в море. Реализация технических разработок на практике позволит существенно повысить уровень заблаговременности прогнозов опасных морских явлений, обеспечит повышение штормовой безопасности мореплавания на морских коммуникациях Дальнего Востока России.

- В результате исследования штормовой мореходности морских судов, разработаны технические предложения о создании самоходных гидрофизических модулей, способных производить длительные гидрофизические измерения в прибрежных открытых морских акваториях, обеспечивая непрерывную доставку информации о состоянии моря по телеметрическим каналам цифровой связи;

- Разработаны и опробованы на практике новые методики использования вычислительных экспериментов для прогноза опасных морских наводнений и цунами в условиях повседневной и тревож-

ной работы морских служб и оперативных центров [144], в обязанности которых входит организация действий по тревоге и выработка решений по минимизации ущерба от морских катастроф природного и техногенного характера.

## Список использованных источников

1. *Аквис М.А., Гольдберг В.В.* Тензорное исчисление. М.: Физматлит, 2003. 304 с.
2. *Андерсен Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990. Том 1,2. 726 с.
3. *Антоненко С.В., Храмушин В.Н., Малащенко А.Е.* Поисковые исследования штормового мореходства / Вестник ДВО РАН. 2004, № 1(113). С. 26-39
4. *Артюшков Л.С.* Динамика неньютоновских жидкостей. СПб: Изд. ГМТУ, 1997. 460 с
5. *Астарита Дж., Маруччи Дж.* Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. М.: Мир, 1978. 309 с.
6. *Астахов А.В., Широков Ю.М.* Курс Физики. т.II, Электромагнитное поле. М.: Наука, 1980. 384 с.
7. *Бабкин А.В., Селиванов В.В.* Прикладная механика сплошных сред. Т.1. Основы механики сплошных сред. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1998. 368 с.
8. *Баррон Д.* Введение в языки программирования. М.: Мир, 1980. 190 с.
9. *Белоцерковский О.М.* Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 519 с.
10. *Белоцерковский О.М.: Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 370 с.
11. *Березкин В.А.* Динамика моря. Свердловск, Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1947. 674 с.
12. *Бернар Ле Меоте,* Введение в гидродинамику и теорию волн на воде, Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 368 с.
13. *Бернгардт Р.П.* Силы ветра (Мера, расчет, польза) г. Александровск-Сахалинский, 1994. 181 с.
14. *Бернштейн В.А.* Задача о заблаговременности тревог цунами от одной гидрофизической станции в полубесконечном бассейне с полосовым дном. Препринт, Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1992. 50 с.
15. *Благовещенский С.Н.* Качка корабля. Л.: Судпромгиз, 1954. 520 с.
16. *Бэтчелор Дж.* Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 760 с.
17. *Ван-Дайк М.* Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 182 с.
18. *Вирт Н.* Алгоритмы + структуры данных = программы. М.: Мир, 1985. 404 с.
19. Волны в пограничных областях океана / *Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.* Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 280 с.
20. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 208 с.

21. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами / Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Марчук Ан.Г., Симонов К.В. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 1989. 168 с.
22. Годунов С.К. Элементы механики сплошной среды, М: Наука, 1963. 303 с.
23. Груздев А.И. 120 лет Отдельной съемке Восточного океана (1879-1999) // Записки Общества изучения Амурского края. Том XXXIII, Владивосток, 1999, С. 124-133.
24. Гусяков В.К., Венценосцева Е.Ю., Глускина Т.Е. Развитие и современное состояние систем предупреждения о цунами на Тихом океане. Обнинск, 1988. 41 с.
25. Давидан И.Н., Лопатухин Л.И. На встречу со штормами. Л.: Гидрометеоиздат, 1982, 136 с.
26. Дерюгин К.К. Работы в Тихом океане // Советские океанографические экспедиции. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. С.162-185.
27. Димитриенко Ю.И. Тензорное исчисление. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
28. Джайлмер Томас С. Проектирование современного корабля. Л.: Судостроение, 1984. 280 с.
29. Дуванин А.И. Волновые движения в море. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 223 с.
30. Егоров Н.И. Физическая океанография, Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 456 с.
31. Единая автоматизированная система наблюдения за возникновением и распространением цунами и предупреждения о них. Технико-экономическое обоснование (ТЭО-2). М.: Госкомитет по гидрометеорологии и контролю окружающей среды. 1987. 106 с.
32. Жуковский Н.Е. Собрание сочинений.Т.2. Гидродинамика. М.:Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1949, 765 с.
33. Жуковский Н.Е. Теоретическая механика. М.:Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1950, 812 с.
34. Жуков Л.А. Общая океанология. Л.: Гидрометеоиздат, 1976, 376 с.
35. Заварина М.В. Строительная климатология. Л.: Гидрометиздат, 1976. 312 с.
36. Зоммерфельд А. Дифференциальные уравнения в частных производных физики. М.: Издательство иностранной литературы. 1950. 457 с.
37. Зоммерфельд А. Механика деформируемых сред. М.: Издательство иностранной литературы. 1954. 491 с.
38. Зоммерфельд А. Электродинамика. М.: Издательство иностранной литературы. 1958. 502 с.
39. Зоммерфельд А. Механика. М.: РХД, 2001, 368 стр.
40. Зубов Н.Н. Отечественные мореплаватели - исследователи океанов и морей. М.: Географгиз, 1954. 474с.
41. Извещения мореплавателям, Выпуск 1, часть 1, 4 января 1999 года, Гидрографическая служба Краснознаменного Тихоокеанского флота.
42. Иванов В.В., Храмущин В.Н. Генерация волн на мелководье. // Известия АН СССР Физика атмосферы и океана. том 27, ном.4, М.,1991г. С. 463-474.

43. Использование судовых природоохранных комплексов и систем, размещенных на борту буровой платформы, для непрерывного контроля экологического состояния нефтепромысловых акваторий. *Гусев А.В., Гуральник Д.Л.: Красный М.Л.: Храмушин В.Н.* // Охрана природы, мониторинг и обустройство сахалинского шельфа. – Южно-Сахалинск, Сахалинское книжное издательство, 2001 (рус, англ), стр. 177-180.
44. Исследование гидродинамического режима на акватории Холмского морского торгового порта. *Храмушин В.Н., Втюрина А.С., Шустин В.А., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н.* / Вестник ДВО РАН. 2004, № 1(113). С. 40-51
45. История штормовой мореходности (от древности до наших дней) : по материалам поисковых и научно-исследовательских работ, Калининград, 1975 – Владивосток–Санкт-Петербург–Сахалин, 2003 / *В.Н. Храмушин, С.В. Антоненко, А.А. Комарицын и др.* – Южно-Сахалинск : Сах. кн. изд-во, 2004. – 288 с., ил. + 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
46. *Като Э. Шевченко Г.В.* Сезонная изменчивость гармонических постоянных приливов у северных берегов острова Сахалин // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курил, Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 2001, с. 27-35.
47. *Кильчевский Н.А.* Элементы тензорного исчисления и его приложения к механике. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. 168 с.
48. *Кочин Н.Е.* Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. М.: Наука, 1965. 424 с.
49. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. Часть 1, 2. М.: Физматгиз, 1963. 584,728 с.
50. *Красный М.Л., Храмушин В.Н.* Единая система государственного мониторинга сахалинского шельфа как важнейший элемент обустройства морских акваторий / Охрана природы, мониторинг и обустройство сахалинского шельфа. – Южно-Сахалинск, Сахалинское книжное издательство, 2001 (рус, англ), стр. 15-30.
51. *Красный М.Л.: Храмушин В.Н.*. Концепция создания системы государственного мониторинга для шельфа острова Сахалин, // Освоение шельфа арктических морей России. Труды пятой международной конференции (11-14 сентября). - Санкт-Петербург, 2001. - С. 331-336.
52. *Крылов А.Н.* Избранные труды. Л.: Академия наук СССР, 1958. 804 с.
53. *Крылов А.Н.* Лекции о приближенных вычислениях. Л.: Академия наук СССР, 1933. 541 с.
54. *Курбатова Г.И., Филиппов В.Б.* Элементы тензорного исчисления. Основы моделирования движущихся сплошных сред. Учебное пособие. СПб: Изд-во СПб университета. 2002. 232 с.
55. *Лавренов И.В.* Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб: Гидрометеоиздат 1998, 500с.

56. *Ламб Г.* Гидродинамика. М.,Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1947, 928 с.
57. *Лаппо Д.Д, Стрекалов С.С., Завьялов В.К.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Л.: ВНИИГ, 1990. 432 с.
58. *Лаппо С.С.* Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М.: "Наука ", 1979, 184 с.
59. *Леви-Чивита Т., Амальди У.* Курс теоретической механики. Т.1, Ч.1. Кинематика. Принципы механики. М.:Л.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР. Главная редакция общетехнической литературы и номографии, 1935, 385 с.
60. *Леви-Чивита Т., Амальди У.* Курс теоретической механики. Т.1, Ч.2. Кинематика. Принципы механики. Статика. М.: Издательство иностранной литературы, 1952, 326 с.
61. *Леви-Чивита Т., Амальди У.* Курс теоретической механики. Т.2, Ч.1 и 2. Динамика систем с конечным числом степеней свободы. М.: Издательство иностранной литературы, 1951, 435 и 555 с.
62. *Леонов А.К.* Региональная океанография. Л.: Гидрометеоизд, 1960, 768 с.
63. *Линдберг Г.У.* Крупные колебания уровня океана в четвертичный период. Л.: Наука. 1972. 548 с.
64. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.:Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1950, 678 с.
65. *Лоренц Г.А.* Теории и модели эфира. М.,Л.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР. Главная редакция общетехнической литературы и номографии, 1936, 68 с.
66. *Лоренц Г.А.* Теория электронов и ее применения к явлениям света и теплового излучения. М.:Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953, 471 с.
67. *Майкл Ласло.* Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++, М, «Издательство Бином», 1997, 301с.
68. *Мак-Коннел А.Дж.,* Введение в тензорный анализ, М.: Наука, 1963, 411с.
69. *Маклаков А.Ф. и др.* Очерки развития отечественного гидрометеорологического приборостроения. Л.: Гидрометиздат, 1976 г, 238 с.
70. *Максвелл Джеймс Кларк,* Трактат об электричестве и магнетизме. Т.1,2. М.: Наука, 1989, 416,437 с.
71. *Марчук Ан.Г., Чубаров Л.Г., Шокин Ю.И.* Численное моделирование волн цунами. - Новосибирск, Наука, 1983. 175с.
72. *Милн-Томсон Л.М.* Теоретическая гидродинамика. М.: Мир, 1964. 570с.
73. *Морошкин К.В.* Водные массы Охотского моря. М.: Наука, 1966. 55 с.
74. *Морошкин К.В.* Многолетние гидрологические наблюдения в Охотском море // Труды ДВНИГМИ. 1963. Вып. 013. С. 64-78.
75. *Морошкин К.В.* Новая схема поверхностных течений Охотского моря // Океанология. 1964. Т.4. Вып.4. С.641-643.

76. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Л.: Гидрометиздат, 1970. 90 с.
77. *Никифоров И.В., Тихонов И.Н., Михайлова Т.Г.*, Оперативная обработка Данных автоматизированной сейсмической станции, Теория и практика // Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. - 175 с.
78. *Ньюмен Дж.* Морская гидродинамика. Л.: Судостроение, 1985. 368 с.
79. Океанология. Термины и определения. ГОСТ 18451-73. ГОСТ 18458-73. М.: Издательство стандартов, 1973, 64 с.
80. Океанология. Физика океана. Т.2. Гидродинамика океана / под ред. Каменкович В.М.: Монина А.С. М.: Наука, 1978, 456 с.
81. Оперативный прогноз наводнений на морских берегах Дальнего Востока России. *Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непон К.И., Королев Ю.П.* Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с. ([shipdesign.ru/Pub/Poplavsky/Book/](http://shipdesign.ru/Pub/Poplavsky/Book/))
82. *Орлов Ю.Ф.* Потенциал ускорений в гидродинамике корабельных волн. Новосибирск: Наука, 1979. 214 с.
83. Особо опасные гидрометеорологические явления. Комплексный справочник (Сахалинская область, Охотское море, Татарский пролив) / под ред. *Барабаш В.Е.* – Южно-Сахалинск, 1973, 178 с.
84. *Павленко Г.Е.* Сопротивление воды движению судов. М.: Водтрансиздат, 1953. 507с.
85. *Панченков А.Н.* Теория потенциала ускорений. Новосибирск: Наука, 1975. 222 с.
86. *Планк Макс.* Введение в механику деформируемых тел. М.: Л.: Государственное издательство, 1929. 207с.
87. *Полякова А.М.* Цунами в приморье 26 мая 1983 года и его последствия. - Владивосток, ДВО РАН, 1988. – 40 с.
88. *Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н.* Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. - М.: Наука, 1988. - 128 с.
89. *Попов Д.Н., Паниотти С.С., Рябинин М.В.* Гидромеханика. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002. 384 с.
90. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. М.: РХД, 2000, 574 стр.
91. *Прандтль Л.: Титтенс О.* Гидро- и аэромеханика. Т. 1. Равновесие. Движение жидкостей без трения. М.,Л.: Государственное технико-теоретическое издание, 1932. 222 с.
92. *Прандтль Л.: Титтенс О.* Гидро- и аэромеханика, Т. 2. Движение жидкостей с трением и технические приложения. М. Л.: Государственное технико-теоретическое издание, 1935. 312 с.
93. Прогнозы штормовых волн. / из серии: Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства. – Обнинск, 1986, 6 с.
94. Пути создания системы мониторинга шельфа Сахалинской области, *Красный М.Л.: Храмушин В.Н., Шустин В.А. и др.* Сахалинское книжное издательство, Южно-Сахалинск, 1998, 208 с.

95. *Пясковский Р.В., Померанец К.С.* Наводнения., Л.: Гидрометеоиздат, 1982, 176 с.
96. *Рабинович А.Б., Файн А.В.* Предвычисление прилива по известным гармоническим постоянным (Т1 ЕР) Аннотированный перечень новых поступлений в ОФАП Госкомгидромета. Обнинск, 1988, С.9. (ВНИИГМИ МЦД. Гидрометеорология, Вып. 3)
97. *Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. – 325 с.
98. Рекомендации по расчету специализированных климатических характеристик. С-ПБ., Гидрометеоиздат, 1997. 74 с.
99. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
100. *Савельев В.Ю., Храмушин В.Н.* О создании информационно-аналитических систем оперативного анализа обстановки на море // Гидрометеорологические процессы на шельфе: оценка воздействия на морскую среду. Труды Дальневосточного ордена трудового красного знамени регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. – Владивосток: Дальнаука, 1998. - С. 159-170.
101. *Самарский А.А., Попов Ю.П.* Разностные методы решения задач газовой динамики, М.: Наука, 1980, 352с.
102. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977, 440 с.
103. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. Т.1,II. М.: «Лань», 2004. 528,560 с.
104. *Симонов К.В., Храмушин В.Н.* Численные расчеты распространения цунами в районе Усть-Камчатска // Природные катастрофы и стихийные бедствия в дальневосточном регионе. – Т.1, Владивосток, ДВО АН СССР, 1990. С. 179-189.
105. *Соловьев С.Л.* Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // Проблема цунами. М.: Наука, 1968. с. 7-50.
106. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л.: Гидрометиздат, 1971, 250 с.
107. Справочник по климату СССР. Часть 3, ветер, Вып. 34. Сахалинская область. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 248 с.
108. *Судольский А. С.* Динамические явления в водоемах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 263 с.
109. *Суховей В.Ф.* Моря мирового океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 288 с.
110. *Стокер Дж.* Волны на воде. М.: Иностранная литература, 1959. 618 с.
111. Таблицы приливов 1960 год. Азиатское побережье СССР и прилегающие иностранные акватории, Л.: Гидрометеоиздат, 1960.
112. *Томсон Дж.Дж.* Электричество и материя. М.,Л.: Государственное издательство. 1928. 263 с.
113. *Триkker Р.* Бор, прибой, волнение и корабельные волны. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969, 288 с.

114. Уинстон П. Искусственный интеллект. М.: Мир, 1980. 519 с.
115. Файн А.В., Храмушин В.Н. Тензорное представление алгоритмов вычислительной гидромеханики. / Вестник ДВО РАН. 2004, № 1(113). С. 52-68
116. Филин А.Н., Прикладная механика твердого деформируемого тела, Т.1, М.: Наука, 1975, 832с.
117. Харлоу Ф. Численный метод частиц в ячейках ждя гидродинамики. // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967, стр 316-342.
118. Хокни Р. Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987, 638 с.
119. Холодилин А.Н. Стабилизация судна на волнении. Л.: Судостроение, 1972. 232 с.
120. Храмушин В.Н. Исследования по оптимизации формы корпуса корабля // Вестник ДВО РАН, № 1(107). Владивосток: Дальнаука, 2003. С.50-65.
121. Храмушин В.Н. Использование особенностей цифровой ЭВМ для постановки вычислительного эксперимента в гидромеханике // Актуальные вопросы геологии геофизики и биологии (материалы XVI конференции молодых ученых ИМГиГ), Южно-Сахалинск, ДВО АН СССР, 1990. С.119-133.
122. Храмушин В.Н. О постановке вычислительного эксперимента в гидромеханике. Реализация задачи о распространении длинных волн. Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО АН СССР, 1988. 41 с.
123. Храмушин В.Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Владивосток: Дальнаука, 2003. 172 с.
124. Храмушин В.Н. Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике // Высокопроизводительные вычисления и их приложения. Материалы всероссийской научной конференции. М.: НИВЦ МГУ, 2000. - С. 114-117.
125. Шебалов А.Н. Нелинейная теория волн и волнового сопротивления: Учебное пособие. Л.: Изд.ЛКИ, 1984. 107 с.
126. Шевченко Г.В., Храмушин В.Н. Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива // Океанология. 1994. Е.34, № 2 С.218-233
127. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. / А.И.Иващенко, В.К.Гусяков, В.А.Джумагалиев, Г.Йех, Л.Д.Жукова, Н.Д.Золотухина, В.М.Кайстренко, Л.Н.Като, А.А.Клочков, Ю.П.Королев, А.А.Кругляков, Е.А.Куликов, В.Н.Куракин, Б.В.Левин, Е.Н.Пелиновский, А.А.Поплавский, В.В.Титов, А.А.Харламов, В.Н.Храмушин, Е.В.Шельтинг. ДАН, 1996, том 348, №4. С.532-538.
128. Щетников Н.А. Цунами на побережье Сахалина и Курильских островов по метеографическим данным 1952-1968 гг. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. – 165 с.

129. *Шокальский Ю.М.* Океанография. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1959, 538 с.
130. *Шокин Ю.М.* Метод дифференциального приближения. Новосибирск: Наука, 1979, 222 с.
131. *Шокин Ю.И., Яненко Н.Н.* Метод дифференциального приближения. Применение к газовой динамике. Новосибирск: Наука, сиб. отд., 1985. 368 с.
132. *Шуликовский В.И.* Классическая дифференциальная геометрия в тензорном изложении. М.: Физматгиз, 1963, 540 с.
133. *Якоби К.* Лекции по динамике. Л.:М.: Главная редакция общетехнической литературы, 1936, 271 с.
134. *Byung Ho Choi*, A tidal model of the Yellow sea end the Eastern Chinasae, KORDI report 80-02, Korea ocean research and development institute, 1980, 71 p.
135. *Kim Kye Young*, Numerical Experiments jn M2 Tide in the Okhotck Sea, Seuol National University, 1992. 68 p.
136. *Khramushin Vasily N.* Stormy seakeeping and navigation safety researches for hull form design / Proc. of the 2nd Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics. Sangman International House, Busan, Korea, June 21-22, 2004. P.398-402
137. *Khramushin Vasily N, Shevchenko George V., Tatiana N. Ivelskaya.* Investigation of long waves in the port Kholmsk, Sakhalin island / ITC 2001, Proceedings, Session 7, Number 7-16. P. 837-848
138. *Lau H.T.* A Numerical Library in C for Scientists and Engineers. London, Tokyo: CRC Press, 1985. 800 p.
139. *Levitus S., Conkright M.E., Gelfeld R.D., T. Boyer.* Word Ocean Atlas 1994 presents new ocean climatologies // Earth System Monitor. December 1993. Vol. 5, No. 2. P. 1-16.
140. *Michell J.H.* The wave resistance of a ship // Philosophical Magazine, ser. 5. London: 1898, Vol. 45. P.106-123.
141. Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 1988. - 740 p.
142. The 1994 Shikotan Earthquake Tsunamis. *Harry Yeh, V.Titov, V.Gusiakov, E.Pelinovsky, V.Kaistrenko, V.Khramushin* / PAGEOPH, Vol.144, Nos.3/4 (1995). P.855-874
143. *William C. Patzert* (Jet Propulsion Laboratory), Oceanography from Space in the 1990s, PICES Press, Vol.2¹ 1, Jan. 1994.
144. *Храмушин В. Н.* «Ani» – Прямые вычислительные эксперименты для моделирования цунами, штормовых нагонов, экстремальных течений и приливного режима в открытом океане и вблизи побережья. СахГУ. РОСПАТЕНТ № 2010615848 от 2010.09.08. ([shipdesign.ru/SoftWare/2010615848.html](http://shipdesign.ru/SoftWare/2010615848.html)).