

## Летняя школа по гидрологии - часть II

### Верхний Нарын, Тянь-Шань, Кыргызстан, измерения и анализ стока

Eric.Pohl@unifr.ch



**CROMO-ADAPT**  
Cryospheric Observation and Modelling for improved Adaptation in Central Asia



UNESCO

we act



**Содержание:**

1. **Введение**
2. **Программы (НОВOware, R, RStudio)**
3. **Подготовка данных (логгер уровня воды "НОВО")**
4. **Подготовка данных (флуорометр "FL30")**
5. **Расчет расхода флуориметра (RStudio)**
6. **Рейтинговая кривая (от уровня воды до сброса; RStudio)**

**С презентациями летней школы можно ознакомиться здесь:**

Обзорные измерения расхода: <https://t.ly/M0I6l>

Эксперименты с трассирующими красителями: <https://t.ly/Qat2Y>

## Введение

В ходе Летней школы Арабель 2023 была представлена стратегия непрерывного мониторинга расхода воды [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] в Верхнем Нарыне, Кыргызстан. Эта стратегия основана на непрерывном мониторинге уровня воды [см] и измерениях фактического расхода. Эти два метода необходимо объединить, построив так называемую *кривую расхода*. Кривая расхода описывает взаимосвязь между уровнем воды и расходом. Чтобы получить кривую расхода, необходимо измерить расходы для разных уровней воды. В лучшем случае для этого используется весь диапазон колебаний уровня воды в ручье или реке. Хотя это невозможно, так как зимний расход может быть крайне низким, можно охватить большую вариабельность за счет сильного суточного таяния и изменчивости расхода.

Для измерения уровня воды использовались и используются такие приборы, как автоматические манометры для измерения уровня сырой воды и автоматические манометры для измерения атмосферного давления. Измеренное давление под водой отражает не только уровень воды, но и высоту воды плюс атмосфера (давление, которое оказывает на нас атмосфера сверху). Изменения атмосферного давления могут быть значительными по отношению к изменениям уровня воды. Разница в атмосферном давлении, например, между 970 гПа и 1020 гПа соответствует разнице в уровне воды в ~50 см! Поэтому нам необходимо корректировать изменения атмосферного давления, вычитая атмосферное давление из давления, измеренного под водой. Во время летней школы мы использовали логгеры Onset HOBO. Для считывания данных необходимо программное обеспечение HOBOware. Оно также позволяет корректировать данные о давлении.

Уровень воды [см] не дает нам информации о том, "Сколько воды течет?". Для построения кривой расхода нам необходимы измерения фактического расхода [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]. Они были сделаны с помощью флуорометра (FL30). Измерения FL30 не говорят нам напрямую о том, сколько воды протекало в момент измерения. Они дают нам концентрации или *кривая проникновения*: Как менялась концентрация трассера с течением времени. Мы используем так называемый *общий метод* для расчета расхода по этой кривой. Для этого метода необходимо знать, какое количество красителя/трассирующего вещества (это может быть и соль) было введено в воду, и насколько сильный сигнал измеряет FL30. Для этого мы подготовили краситель перед полевыми работами, тщательно отмерив 50 г красителя и приготовив 50 мл пробирки с 50  $\mu\text{g}$  раствора красителя. В полевых условиях мы откалибровали FL30 по одной или двумя пробирками. В расчетах мы будем использовать эту информацию. Поэтому важно записывать, сколько трассера мы использовали в определенное время.

**Глобальный метод основан** на зависимости между количеством введенного трассирующего вещества и его концентрацией, измеренной с течением времени. Одним из важнейших условий является равномерное распределение/смешивание цвета. Это означает, что концентрация везде в поперечном сечении должна быть одинаковой. Это позволяет нам проводить измерения в любом месте, например, на берегу реки, не зная, как выглядит поперечное сечение. Важные параметры, которые необходимо знать - это количество трассера (сколько граммов) и кривая концентрации, которую также называют кривой проникновения. Более подробно методы описаны в презентации PowerPoint.

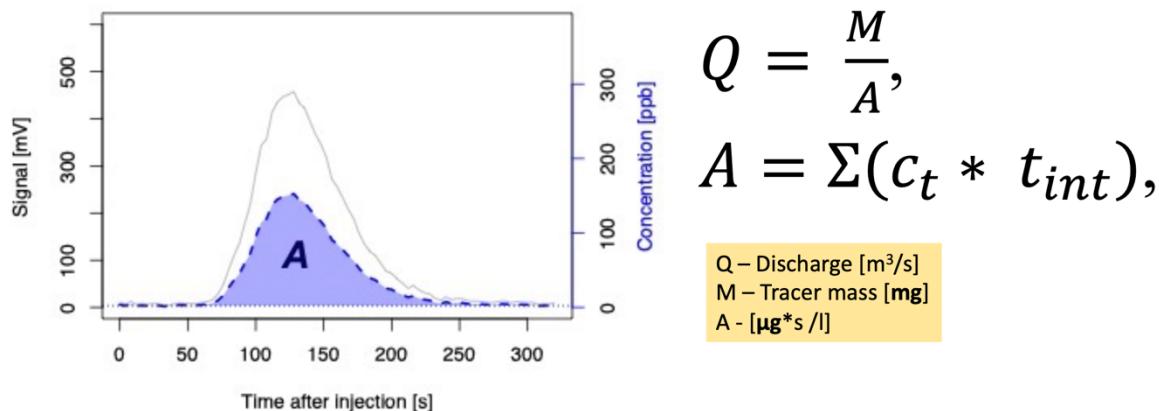


Рисунок 1: Измерение разряда с помощью общего метода. "Q" - расход в  $\text{m}^3/\text{s}$ , "M" - масса трассера в  $\text{mg}$ , а "A" - площадь под кривой. Различные единицы измерения ( $\text{mg}$  и  $\mu\text{g}$ ) обусловлены коэффициентом 1000 для перехода от литра к  $\text{m}^3$ .

## Программы

Основная часть анализа проводится в свободно распространяемом программном обеспечении **R** и **RStudio**. R - это программа, разработанная для статистики, но ее также можно использовать для некоторых автоматизированных расчетов и построения графиков. Мы используем ее для объединения различных типов данных, обеспечения соответствия временного формата и применения статистических методов для получения моделей взаимосвязи двух переменных друг с другом (линейная регрессия). RStudio - это графический пользовательский интерфейс для R, позволяющий строить интерактивные графики, которые мы будем использовать при анализе кривых концентрации. Для считывания данных с регистраторов уровня воды и атмосферного давления используется программное обеспечение **HOBOware**. В этом курсе данные будут представлены в виде текстовых файлов с разделителями-запятыми (CSV или txt). Эти файлы можно открыть в любом текстовом редакторе, а также в OpenOffice, LibreOffice или Microsoft Excel. После подготовки файла (см. "Подготовка данных FL30") его необходимо сохранить в формате .xlsx. Это можно сделать с помощью Excel, LibreOffice или OpenOffice.

Основная обработка происходит в RStudio, поскольку она позволяет выполнять отдельные шаги для расчета разрядки:

- 1) Удаление фонового шума
- 2) Калибровка сигнала от мВ до  $\mu\text{g/l}$  (=ppb)
- 3) Выбор "кривой проникновения"
- 4) Расчет расхода
- 5) Расчет кривой расхода

**Этот курс не требует предыдущего опыта программирования.** Мы используем так называемые **скрипты**, которые представляют собой текстовые документы с кодом R внутри. Они будут выполняться RStudio, как небольшие программы. Эти скрипты представлены в текстовом формате, а RStudio преобразует их в компьютерные программы, которые будут выполнять вычисления за нас. Однако мы будем вносить некоторые корректировки в эти скрипты, чтобы изменить **аргументы**. Например, сколько трассирующего вещества мы ввели, или название электронных таблиц, которые нужно считать.

Внутри RStudio есть разные окна. В главном окне отображается **скрипт**, в нижнем окне - **консоль** (она показывает вывод кода), а справа внизу - **графики**. В окне скрипта находятся строки кода для каждого скрипта. Строки кода можно запускать или выполнять по очереди. В Windows и Linux это делается нажатием кнопок [Ctrl] + [Enter], в Mac - [command] + [Enter]. Каждая запущенная строка будет выдавать некоторый результат, который отобразится в **консоли** или в виде графика в **окне plot**. Мы будем упражняться в этом вместе.

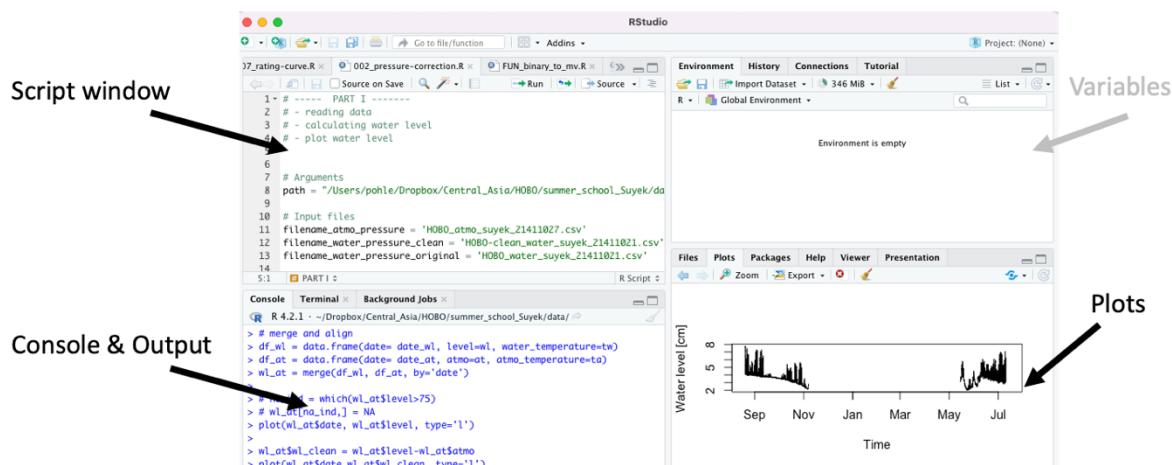


Рисунок 2: Обзор RStudio с различными окнами.

## Подготовка данных (НОВО)

Временные ряды уровня воды служат основой для создания временных рядов расходов. Для подготовки необходимы два файла: 1) временной ряд уровня воды и 2) временной ряд атмосферного давления. Обычно оба временных ряда поступают непосредственно

от приборов, установленных в полевых условиях. Регистратор давления воды находится в воде, а регистратор атмосферного давления - где-то поблизости (может находиться на расстоянии около 100 м). Если данные об атмосферном давлении утеряны, можно также использовать данные о давлении с расположенной поблизости автоматической метеостанции или другой метеорологической станции. Легче всего обрабатывать данные, если оба временных ряда имеют одинаковый интервал измерений. Если интервал не совпадает, необходимо интерполировать данные об атмосферном давлении, чтобы они соответствовали временным шагам данных об уровне воды. В качестве альтернативы можно опустить некоторые точки данных об уровне воды, чтобы они соответствовали точкам данных об атмосферном давлении.

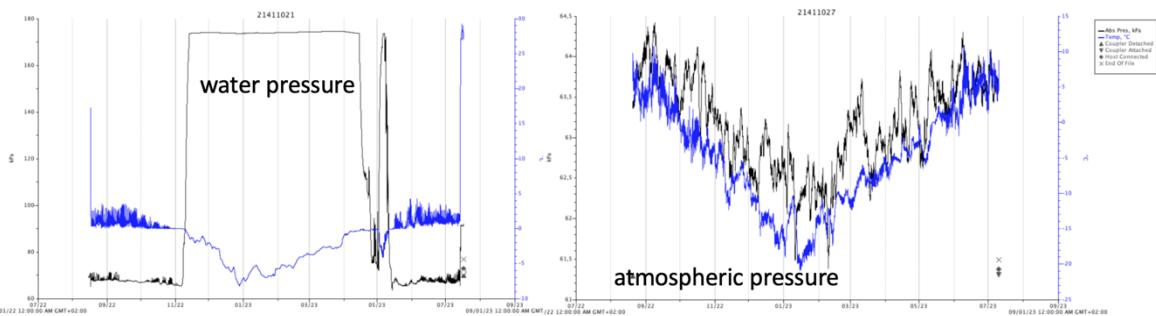


Рисунок 3: Пример данных по давлению воды и атмосферному давлению за 2022-2023 гг. в Батыш-Суеке (Суек) до очистки данных.

Как видно на рисунке выше, зимой данные о давлении воды могут выглядеть странно. Это происходит потому, что вода вокруг регистратора замерзает и значительно повышает давление. Эти данные бесполезны для расчета расхода и должны быть удалены для наших целей. Это проще всего сделать в программе электронных таблиц, например Excel. Но имейте в виду, что Excel может произвольно изменить формат времени. **Всегда используйте копию исходного файла данных и никогда не работайте в своем оригинале.** Хороший способ очистки данных - удалить только значения уровня воды, но сохранить остальные данные (температуру и дату). Это позволит впоследствии взять исходные даты и собрать временной ряд с этими датами, если Excel нарушил формат времени.

Фактическая коррекция заключается в простом вычитании атмосферного давления из показаний регистратора уровня воды. В результате получается только уровень воды. Это окончательные данные, полученные на данном этапе.

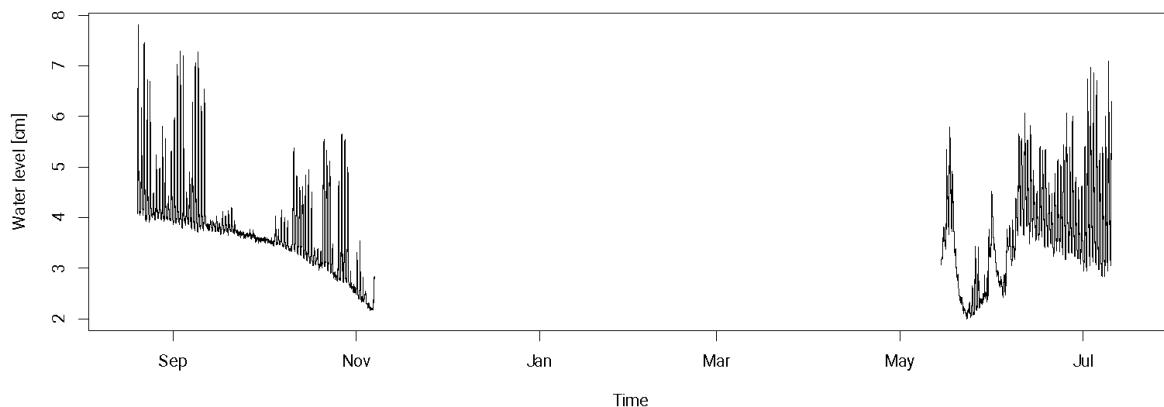


Рисунок 4: Уровень воды после очистки (период замерзания) и удаления сигнала атмосферного давления. Этот процесс выполняется в Excel (удаление данных, где вода заморожена) и RStudio (объединение наборов данных атмосферного и водного давления и вычитание атмосферного давления - скрипт: 002\_pressure-correction.R).

## Подготовка данных (FL30)

FL30 хранит данные в специальном двоичном формате, который для нас нечитаем. Этот формат необходимо сначала перевести в читаемый текстовый формат. Все измерения сохраняются в этом файле непрерывно. Поэтому на втором этапе данные можно разделить на несколько частей, что облегчает поиск отдельных концентрационных кривых. Самый простой способ, на мой взгляд, - использовать программу электронных таблиц (например, Excel), чтобы разрезать эти измерения на отдельные части. Каждое измерение можно хранить в отдельной электронной таблице. Наилучшим вариантом для названия электронных таблиц является комбинация даты и времени измерения. После того как все измерения будут организованы в отдельные электронные таблицы, данные будут готовы к обработке в RStudio.

```

A 09:07:23 05:45:08 A 001 33386 001 40662 192 52961 018 38723
A 09:07:23 05:45:10 A 001 33614 001 42587 192 44230 018 38240
A 09:07:23 05:45:12 A 001 42139 001 42443 192 34674 018 37928
A 09:07:23 05:45:14 A 001 36841 001 46385 192 29070 018 38046
A 09:07:23 05:45:16 A 001 37310 001 46266 192 25523 018 38256
...
date Tracer1 Battery Baseline Temperature
2023-07-09 05:45:04 16.3 11.42 14.74 18.17
2023-07-09 05:45:06 16.01 11.43 14.68 18.16
2023-07-09 05:45:08 15.82 11.42 14.74 18.16
2023-07-09 05:45:10 16.11 11.41 14.77 18.15
2023-07-09 05:45:12 16.09 11.4 16.04 18.14
2023-07-09 05:45:14 16.68 11.4 15.26 18.15
2023-07-09 05:45:16 16.66 11.39 15.33 18.15
...

```

Рисунок 5: Данные флуориметра в обычном текстовом редакторе до (вверху) и после (внизу) перевода из двоичного в читаемый формат данных. Данные трассировки (краситель) теперь представлены в мВ.

## Wrong time and date (FL30 clock)

## Corrected time (check notebook)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	date	time	time_adj	Tracer1	Battery	Baseline	Temperature	
23	09.07.23	05:45:46	15:05:46	16.24	11.35	14.83	18.29	
24	09.07.23	05:45:48	15:05:48	16.21	11.35	14.74	18.31	
25	09.07.23	05:45:50	15:05:50	16.3	11.35	14.7	18.33	
26	09.07.23	05:45:52	15:05:52	16.23	11.34	14.74	18.34	
27	09.07.23	05:45:54	15:05:54	16.08	11.34	14.68	18.36	
28	09.07.23	05:45:56	15:05:56	16.17	11.34	14.76	18.38	

All data

Data of experiment @ 14:54 2023-07-12

*Рисунок 6: Обзор тех же данных FL30, что и на предыдущем рисунке, но теперь в Excel. Часы FL30 не установлены (старый логгер с проблемами с батареей). Проверьте полевой блокнот, чтобы определить измерения и правильное местное время. Цветные значения - это условно отформатированные ячейки. Это позволяет находить изменения концентрации на глаз. Каждый эксперимент вставляется в новую электронную таблицу (внизу) с именем, соответствующим дате и времени эксперимента. В конце файла необходимо сохранить как файл .xlsx.*

## Расчет расхода флуориметра (RStudio)

## Сценарии и аргументы

Как уже говорилось, всего в RStudio необходимо выполнить 5 шагов. В этой части отдельные шаги описаны немного подробнее. Для практического применения все **скрипты** представлены в материалах для скачивания. Аргументы, такие как количество вводимой трассирующей жидкости или названия электронных таблиц, должны быть изменены нами. **Скрипты** имеют окончание файла ".R" и должны автоматически открываться в **RStudio**. Если это не так, можно щелкнуть правой кнопкой мыши, выбрать "Открыть с помощью ..." и выбрать RStudio. Скрипты автоматически откроются в RStudio. В начале каждого скрипта находятся аргументы, которые необходимо настроить.

Каждый скрипт для расчета расхода воды из FL30 требует некоторых аргументов. К ним относятся:

1. Имя файла (Excel) (включая путь/папку)
  2. Имя электронной таблицы
  3. Концентрация исходного цветного раствора в **мг/л**
  4. Количество трассирующего вещества, закачанного в реку, в **литрах**

(1) Файл должен быть помещен в папку на вашем компьютере. Необходимо определить имя файла и путь к нему:

"C:/discharge/fluorometer discharge arabel.xlsx" (Windows)

"'/Users/username/fluorometer discharge arabel.xlsx'" (Linux/OSX)

(2) Имя электронной таблицы должно совпадать с именем электронной таблицы в вашем файле Excel:

"230828\_0945" (пример: 2023-08-28 9:45)

(3) Приготовленные растворы с красителем обычно получаются в результате растворения определенного количества трассера в 1 литре воды. В большинстве случаев концентрация составляет 50 г/литр. Только при очень больших расходах (например, на леднике Абрамова) используется большее количество трассера. Раствора объемом 1 л с концентрацией 50 г/л хватает на 10-20 измерений в зависимости от расхода. Исходный базовый раствор должен быть внесен в аргумент **Standard**. Значение должно быть в г/литр.

(4) Количество трассирующего вещества, используемого для эксперимента, является аргументом **TracerVolume**. Это значение должно быть в литрах.

## Обработка

В оставшейся части сценария будут рассмотрены отдельные этапы обработки. Краткое описание того, что делает тот или иной шаг, приведено в следующих подразделах. Обзор всех этапов обработки:

- 1) Удаление фонового шума
- 2) Калибровка сигнала от мВ до мкг/л (=ppb)
- 3) Выбор "кривой проникновения"
- 4) Расчет расхода
- 5) Расчет кривой расхода

### *Удаление фонового шума*

Сигнал в мВ показывает фоновый сигнал, когда мы знаем, что концентрация равна 0, но сигнал в мВ выше 0 (например, 30 мВ). Когда мы калибуруем мВ-сигнал с помощью нашей калибровочной жидкости, мы должны удалить этот ложный сигнал. Для этого скрипт построит для нас график всего эксперимента, и мы можем **щелкнуть на графике, чтобы определить 2 точки (начало и конец) периода**, в котором, как мы знаем, **нет красителя** в воде. После двух щелчков (точки появятся на графике) в следующих строках будет рассчитан средний уровень сигнала за этот период. Это значение автоматически вычитается из исходного сигнала.

### *Калибровка сигнала от мВ до мкг/л (=ppb)*

Для калибровки флуориметра использовалось ведро с 5 л речной воды. В 5 литров речной воды мы добавили пробирки по 50 мл с концентрацией цвета 250 мкг/л. Таким образом, приблизительная концентрация в ведре составила  $250/5 = 50$  мкг/л. Поскольку мы также добавляем 50 мл воды, точная концентрация составляет 49,5 мкг/л или, выражаясь в частях на миллиард (ppb), 49.5 ppb. При добавлении второй пробирки в ведро концентрация составляет 98,04 ppb. Скрипт позволяет нам определить эти точки

концентрации (до трех точек). В окне графика мы можем выбрать легко идентифицируемые точки калибровки так же, как и при выборе фонового шума, щелкнув 2 раза на графике. Скрипт рассчитает среднее значение мВ сигнала калибровочной фазы для одной, двух или трех точек. После этого с помощью линейной регрессии определяется соответствие мВ-сигнала калиброванным концентрациям. На графике будет показана эта зависимость. График может помочь выявить проблемы в калибровке: Хорошо ли точки лежат на линии (хорошо) или они отклоняются (плохо)?

Не каждое измерение имеет точки калибровки. Если в одном из измерений нет точек калибровки, можно использовать калибровку из предыдущего измерения. Если вы рассчитали все эксперименты по сбросу за один сеанс, то в R сохраняется последняя выявленная зависимость. Если вы не проводили калибровку в R, то нужно открыть одно из измерений с калибровкой и запустить сценарий до этой точки. В лучшем случае выберите калибровку, при которой качество воды (особенно концентрация взвеси) было аналогично измерению.

Наконец, сигнал мВ преобразуется в сигнал  $ppb$  с помощью определенной зависимости. Этот сигнал  $ppb$  используется на следующем этапе для расчета площади кривой проникновения.

### *Выбор кривой проникновения*

Кривая проникновения имеет характерную форму с резким увеличением и медленным спадом сигнала. Точно так же, как мы выбирали фоновый шум и точки калибровки, теперь нам нужно выбрать начальную и конечную точки кривой проникновения. Как только это будет сделано, скрипт уже рассчитает для нас расход. Это делается путем деления количества трассирующего вещества на площадь под кривой (AUC) кривой прорыва. Количество трассирующего вещества рассчитывается путем умножения количества трассирующего вещества на концентрацию Standard.

Теперь нам нужно сохранить результат измерения расхода. Это можно сделать в новом файле электронной таблицы (новый файл). Будет полезно записать дату, время и рассчитанный расход. Это нужно делать для каждого измерения. Чем больше точек, тем лучше.

### *Расчет кривой расхода*

После того как мы получили все результаты измерений расхода, можно приступить к расчету кривой расхода. Взаимосвязь между уровнем воды и расходом зависит, помимо прочего, от уклона реки и формы ее поперечного сечения. Именно поэтому кривая расхода строится для определенной точки. В этой точке измеряется уровень воды. Эта зависимость также не является линейной. Поэтому мы подгоним полиномиальную

кривую к измеренным точкам. Для этого существует отдельный скрипт на языке R. Получив эту кривую, мы можем преобразовать значения уровня воды в значения расхода.