

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Коваленко Алла Александровна

Выпускная квалификационная работа

Расчет неустановившегося движения воды на одномерной модели

Основная образовательная программа бакалавриата

«Гидрометеорология»

Профиль «Гидрология»

Научный руководитель:

к.г.н., доц., с.н.с. Т. А. Виноградова

_____ 2018
«__» _____

Заведующий кафедрой:

к.г.н., доц., Г. В. Пряхина

_____ 2018
«__» _____

Санкт-Петербург

2018

Содержание

Введение	3
Глава 1. Краткое гидрографическое описание исследуемых объектов.....	4
Глава 2. Методы расчета неустановившегося движения воды.....	7
2.1. Неустановившееся движение воды.	7
2.2. Методы расчета неустановившегося движения воды.	7
2.3. Уравнение Сен-Венана. Основные допущения.....	9
2.4. Численная схема Института гидродинамики СО АН СССР.	11
2.5. Исходная информация для расчета неустановившегося движения воды.....	12
Глава 3. Создание информационной базы для моделирования и расчета.....	16
3.1. Выбор расчетных участков.....	17
3.2. Выбор расчетных интервалов по времени и длине.	22
3.3. Гидравлико-морфометрические характеристики.....	22
3.4. Задание начальных и граничных условий.	25
3.5. Задание бокового притока и оттока.	28
3.6. Задание коэффициентов шероховатости.....	30
3.7. Внесение данных в оболочку модели.	31
3.8. Вывод результатов.	34
Глава 4. Результаты моделирования.....	35
4.1 Коэффициент соответствия NS.....	35
4.2. Моделирование на основе рассчитанных коэффициентов шероховатости. ...	36
4.3. Корректировка параметров модели.....	39
Заключение	40
Список литературы.....	42
Приложение	44

Введение

В современном мире особое внимание уделяется водным ресурсам. С каждым годом увеличивается использование ресурсов пресных вод рек, озер и водохранилищ, на основе чего все большую актуальность приобретает прогнозирование речного стока, моделирование его различных характеристик, для дальнейшего их использования в различных практических и научных целях.

Целью данной работы является расчет неустановившегося движения воды при помощи одномерной модели, основанной на численной схеме Института гидродинамики, для трех водных объектов: рек Ардон, Ока и Тосна.

Численное моделирование позволяет производить расчеты неустановившегося движения воды на расчетных участках, информация по которым необходима интересующейся проектной организации. Моделировать возможно с любым расчетным шагом по времени и пространству. Данный метод подходит для решения практических вопросов и задач благодаря тому, что есть возможность рассчитать характеристики потока, которые трудно получить в естественных условиях, а именно: расходы, уровни, скорости течения, площади поперечного сечения, числа Рейнольдса и Фруда. В данной работе информационная база для моделирования формировалась таким образом, чтобы для разных рек (горных и равнинных) использовался разный объем исходных данных, натурные и полевые наблюдения, с целью посмотреть все возможности модели.

Основные задачи данной работы заключаются в:

- Создание информационной базы для моделирования: гидравлично-морфометрические характеристики, граничные и начальные условия, параметры модели.
- Проведение расчетов, используя заданные параметры, и адаптация модели.
- Определение критерия качества NS (Nash Sutcliffe model efficiency coefficient).
- Корректировка гидравлических параметров модели.
- Анализ полученных результатов.

Глава 1. Краткое гидрографическое описание исследуемых объектов.

В качестве исходной информации для данной работы были взяты данные как натуральных наблюдений (река Ока), так и данные полученные в полевых исследованиях (реки Ардон, Тосна). Реки были выбраны таким образом, чтобы можно было посмотреть, как модель будет работать в разных условиях (р.Ардон – горная река, реки Ока и Тосна протекают по равнинным территориям), а также моделирование при разном объеме исходной информации.

Река Ока – один из крупнейших притоков Волги. Берет начало из родника в с. Александровке в Орловской области и протекает по центральной части Среднерусской возвышенности (Ресурсы поверхностных вод СССР... 1966). Впадает в Волгу в районе Нижнего Новгорода. Водосбор Оки имеет северо-восточную ориентацию и площадь в 245 тысяч км². Длина реки около 1500 км. Исток находится в 52°21'26.28" северной широты и 36°12'57.23" восточной долготы, устье - 56°19'59.16" северной широты, 43°59'6" восточной долготы (ru.wikipedia.org). Абсолютные отметки высоты над уровнем моря изменяются от 221 мБС (исток) до 60 мБС (устье).

Условно течение реки можно разбить на 3 участка. Верхнее течение характеризуется хорошо разработанной долиной, формированием сегментных излучин. В районе Калуги ширина русла достигает 400 м. Среднее течение начинается от впадения реки Москва. Ширина русла увеличивается до 550 м. Ниже Муромы начинается нижнее течение участка Оки относительно прямолинейные иногда чередуются с участками разветвлённого русла (Ресурсы поверхностных вод СССР... 1966).

На рисунке 1 представлен типичный гидрограф реки Оки. Данные ежедневных расходов взяты с поста Половское за 1978 год (станция является замыкающим створом выбранного расчетного участка для моделирования). Увеличение расхода воды начинается в конце марта. Половодье продолжается до конца июня. Далее следуют небольшие пики летне-осенних паводков.

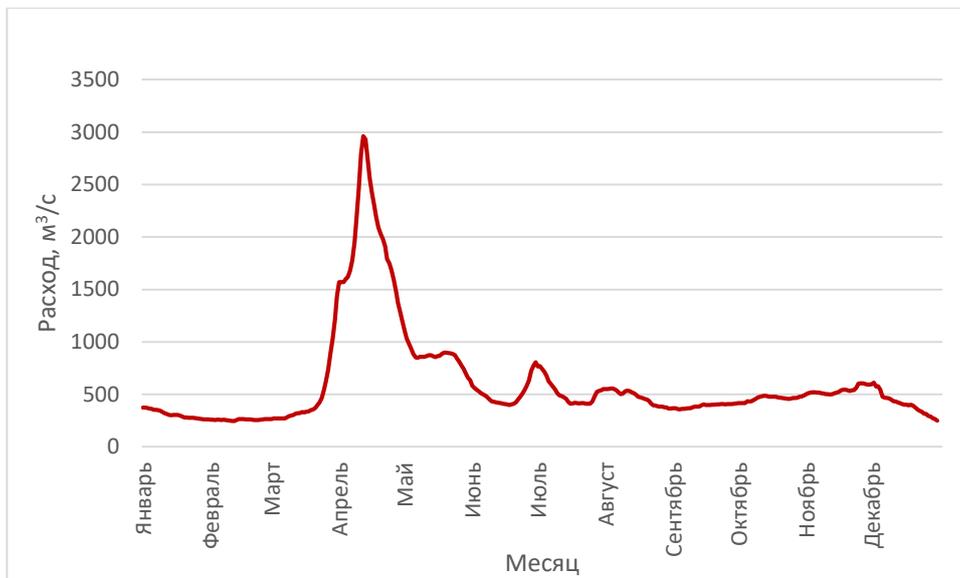


Рисунок 1. Типичный гидрограф реки Ока (пост Половское 1978 год).

Река Тосна является левым притоком реки Невы. Берет начало недалеко от деревни Поддубье, далее Тосна протекает по Приневской равнине и впадает в Неву в Кировском районе (Лопатин Д. В., Болтрамович С. Ф., Сытина И. А., 2009). Водосбор Тосны имеет северную ориентацию и площадь в 1 640 км² (Ресурсы поверхностных вод СССР...1965). Длина реки около 120 км. Исток находится в 59°02'48" северной широты и 30°47'29" восточной долготы, устье - 59°45'43" северной широты, 30°45'29" восточной долготы (ru.wikipedia.org). Абсолютные отметки высоты над уровнем моря изменяются от 72 мБС (исток) до 7 мБС (устье).

На рисунке 4 представлен типичный гидрограф реки Тосна. Данные ежедневных расходов взяты с поста Тосно за 2008 год. Увеличение расхода воды начинается в начале апреля. Половодье продолжается до начала июня. Далее следует летняя межень, заканчивающаяся в конце августа. Основные пики паводков на реке Тосна наблюдаются с начала осеннего периода до середины декабря.

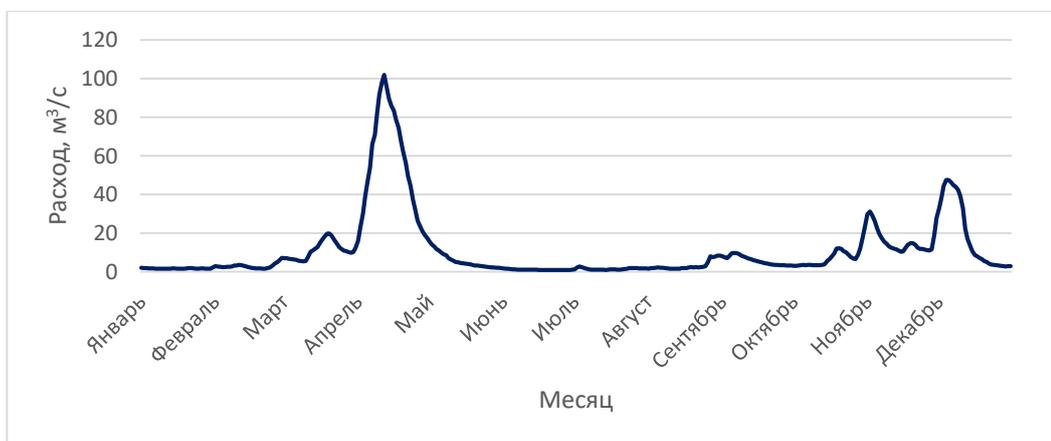


Рисунок 2. Типичный гидрограф реки Тосна (пост Тосно 2008 год).

Река Ардон – левый приток Терека, протекает на юге России по территории Северного Кавказа. Ардон образуется при слиянии рек Мамисондон, Нардон, Адайком и Цмиакомдон, берущих начало в ледниках Главного Кавказского хребта (Ресурсы поверхностных вод СССР... 1973). Территория пролегает в межгорной котловине Северо-Осетинского заповедника между Скалистым и Большим Кавказским хребтами. Бассейн реки Ардон имеет северо-восточную экспозицию. Длина реки составляет 102 км, площадь бассейна 2 700 км². Исток находится в 42°41'36" северной широты и 43°58'30" восточной долготы, устье - 43°14'18" северной широты 44°18'52" восточной долготы (ru.wikipedia.org). Абсолютные отметки высоты над уровнем моря изменяются от 2 420 мБС (исток) до 360 мБС (устье) (Инженерно-гидрологические изыскания по р. Баддон...2015).

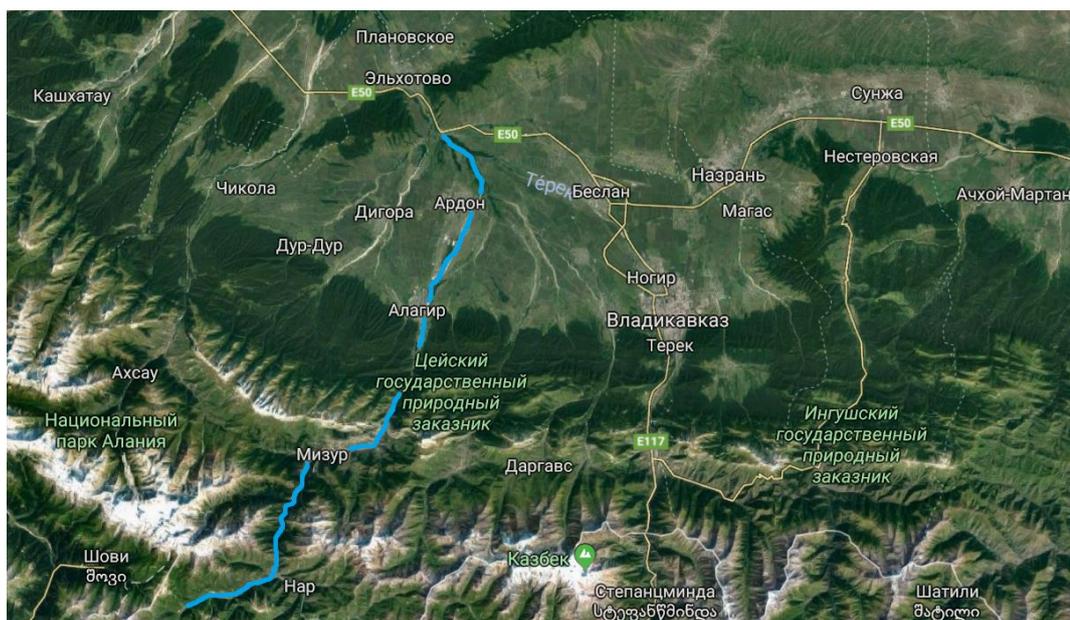


Рисунок 3. Река Ардон (google.maps).

Расчетные участки на реке Ардон были выбраны таким образом, чтобы учитывать впадение притока – реки Баддон. Река Баддон – правый приток Ардона - берет своё начало на северных склонах Кавказского хребта у подножья горы Цмиакомхох с отметкой 4117 м. Река протекает в Бадском ущелье и впадает в Ардон на 58 км от устья Ардона. Длина р. Баддон составляет 13 км с площадью водосбора 42 км². Средняя высота водосбора 2540 м, залесенность — 10%, площадь ледников — 9% (Ресурсы поверхностных вод...1973).

Глава 2. Методы расчета неустановившегося движения воды.

2.1. Неустановившееся движение воды.

При неустановившемся движении воды такие характеристики потока, как расход, скорость, площадь поперечного сечения и т.д. изменяются в каждом расчетном створе в течении времени. В каждый отдельно взятый момент времени эти характеристики будут различными по всей длине расчетного участка реки. Такой тип движения в открытых руслах наблюдается при прохождении волны паводка или половодья. Неустановившееся движение является самым общим случаем движения; установившееся (равномерное и неравномерное) – его частный случай (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015).

Задачей расчёта неустановившегося движения воды является определение двух характеристик: расхода Q и уровня Z и получение зависимостей вида $Q = f(x,t)$, $Z = f(x,t)$. По значениям расходов и уровней могут быть определены и другие характеристики потока в расчетном створе как полностью, так и конкретно интересующие отдельные величины (Грушевский М.С., 1982).

В открытых руслах неустановившееся движение наблюдается в форме длинных волн в продольном сечении потока, когда длина волны превышает глубину воды. Длинные волны переносят значительные массы воды, поэтому их часто называют волнами перемещения (Грушевский М.С., 1969).

2.2. Методы расчета неустановившегося движения воды.

При выборе метода расчета необходимо учитывать, как особенности выбранного объекта исследования, так и специфику поставленной задачи. Исходя из поставленной задачи можно произвести полный расчет неустановившегося движения воды или частичный (Грушевский М.С., 1969). При полном расчете получают значения расходов и уровней воды в функции от продольной координаты (x) и времени (t). При этом необходима исходная информация по нескольким расчетным створам в виде гидрографов и графиков хода уровня воды. При частном расчете определяются конкретные величины. По М.С. Грушевскому, частные расчеты чаще всего применяют для:

- а) расчета гидрографа или графика хода уровня только для замыкающего створа бьефа;
- б) расчета только максимальных или только минимальных уровней или расходов воды в нескольких створах или по всей длине бьефа;

- в) определения моментов времени, в которые в заданных створах проходят максимальные (минимальные) уровни или расходы (определение соответствующих скоростей добегания и времени добегания);
- д) расчета графиков напора в створе ГЭС.

Существует две группы методов расчетов: строгие (гидродинамические) и упрощенные (инженерные). Строгие методы основываются на решении системы уравнений Сен-Венана. Уравнения вводятся при определённых допущениях. Строгие методы можно разделить на нелинейные и линейные. К первым относятся методы характеристик, сеток, мгновенных режимов (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015). В нелинейных методах система дифференциальных уравнений в частных производных решается путем их замены разностными отношениями. В линейных строгих методах эти дифференциальные уравнения линеаризуются (Грушевский М.С., 1982). Строгие методы в основном применяются в проектной практике, при эксплуатации гидросооружений и для гидропрогнозов.

При упрощённых методах уравнения не интегрируются и заменяются более упрощенной моделью нужного явления. Благодаря отказу от детального задания исходной информации (например, граничные условия в замыкающем створе не задаются) эти методы являются достаточно простыми в применении. Модели описываются обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями. Такие методы часто применяются при недостаточном количестве информации для использования строгих методов (Грушевский М.С., 1982). Также для упрощенных методов необходимо меньшее количество времени.

В линейных методах используются линейные модели нелинейного процесса неустановившегося движения воды в открытых руслах (Грушевский М.С., 1982). Это системы, описанные линейными дифференциальными уравнениями. Линейные системы основаны на принципе суперпозиции, то есть реакция системы на воздействие $A + B$ равна сумме реакций этой системы на независимые воздействия A и B (Грушевский М.С., 1982). Для таких моделей исходные гидравлические и морфометрические характеристики задаются вдоль всего рассматриваемого участка реки.

В зависимости от того необходимо ли получить сложные и длительные вычисления промежуточных сведений в виде полей или будет удовлетворительным результатом получение полос и линий стекания выбирается двумерная или одномерная модель расчета неустановившегося движения воды соответственно (Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А., 2008). Исходя из целей исследования, имеющихся данных,

вычислительных ресурсов, точности требования и операционной эффективности в режиме реального времени, оба этих подхода могут быть использованы для гидродинамического моделирования (Ahmad, S., Simonovic, S. P., 1999). При одномерном моделировании допускаются следующие предположения:

1. Вода несжимаема и однородна, то есть без существенных изменений плотности.
2. Уклон дна принимается малым.
3. Длина волны велика по сравнению с глубинами воды. Это позволяет рассматривать поток в одном направлении, вертикальные составляющие скорости пренебрегаются.

Одномерное моделирование требует, чтобы переменные (скорость, глубина и т. д.) изменялись преимущественно в одном определенном направлении (x) вдоль потока воды (Alvarado A., Robinson D., 2012). Учитывая, что водотоки редко бывают прямыми, вычислительное направление принимается вдоль центральной линии водотока.

Двумерные модели вычисляют компоненты скорости в двух направлениях (V_x и V_y) или величину и направление вектора скорости по всей области модели (Alvarado A., Robinson D., 2012). Поэтому двумерные модели избегают многих предположений, требуемых одномерными моделями.

2.3. Уравнение Сен-Венана. Основные допущения.

При моделировании используются уравнения Сен-Венана, описывающие одномерное неустановившееся движение воды по открытому руслу под действием силы тяжести (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015). В таких моделях существует ряд допущений. Например, принимается, что центробежный эффект пренебрежимо мал, как следствие, свободная поверхность принимается горизонтальной в каждом сечении: $\xi = \xi(t, x)$ (t — время, ось Ox направлена вдоль русла). Считается, что движение воды медленно изменяющееся, что позволяет не учитывать местные потери напора (например, вследствие резкого изменения (сужения и расширения) русла) (Кареева Е.Д., Федоров Г.А., 2008). Коэффициент шероховатости n , который описывает сопротивление подстилающей поверхности, в русле осредняется по ω (Кареева Е.Д., Федоров Г.А., 2008).

При одномерном моделировании в основном используется следующая система уравнений:

$$I = i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\alpha}{g} V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V|V|}{C^2 R} + \frac{qV}{g\omega} \quad \text{уравнение динамического равновесия (1)}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{уравнение неразрывности (2)}$$

Независимыми переменными в уравнениях (1) и (2) являются x и t – независимые переменные (координата и время), их функции – глубина h и средняя скорость V .

ω – площадь живого сечения (м^2)

Q – расход ($\text{м}^3/\text{с}$)

C – коэффициент Шези

R – гидравлический радиус (для широкого открытого русла его можно заменить средней глубиной h)

g – ускорение свободного падения

α и β – коэффициенты, характеризующие неравномерность распределения скоростей по поперечному сечению

q – боковой приток на единицу длины. В случае его отсутствия правая часть уравнения (2) равна нулю.

i_0 – уклон дна

$\partial h / \partial x$ – дополнительный уклон, связанный с изменением глубин по длине русла

Γ – поверхностный уклон

Первое слагаемое уравнения учитывает изменение скоростей по длине расчетного участка (отражает неравномерность течения). Для рек этот член обычно невелик, но его значение увеличивается в зонах резкого изменения сечения (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015). Второе слагаемое справа – уклон, связанный с изменением скоростей во времени; он также обычно мал, кроме зоны резкого неустановившегося движения. Первые два слагаемых – это инерционные члены – учитывают влияние скоростей течения. Третье слагаемое правой части учитывает уклон трения (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015).

При использовании уравнения Сен-Венана в моделировании неустановившегося движения воды принимаются во внимания следующие допущения (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015):

1. Рассматривается одномерное неустановившееся движение жидкости. Пренебрегаются поперечные и вертикальные составляющие скорости в открытом русле по сравнению с продольной составляющей. Скорость течения принимается одинаковой во всём поперечном сечении. Указанное допущение означает также пренебрежение поперечным уклоном свободной поверхности воды (поверхность в любом сечении горизонтальна).

2. Движение принимается медленно изменяющимся, что позволяет не учитывать местные потери напора.
3. Глубина воды считается малой по сравнению с длиной волны. Это позволяет принимать гидростатический закон распределения давления по глубине, т.е. пренебрегать избыточным давлением за счёт ускорения воды в вертикальном направлении. При этом плотность воды принимается постоянной по сечению.
4. Силы сопротивления вводятся в уравнения в таком же виде, как и для равномерного движения. Сен-Венан не дал какого-либо определённого выражения для сил трения, хотя член трения, как таковой, фигурировал в уравнении динамического равновесия. По существу, это означало предположение, что суммарное влияние сил трения и турбулентности можно учесть включением в уравнение некоторой силы сопротивления.
5. Уклон дна принимается малым по сравнению с единицей.

Также существует еще одно допущение, на которое указывает В. И. Корень: русло считается достаточно прямым. Если его развернуть в прямую линию, это не вызовет серьезных ошибок в вычислениях.

2.4. Численная схема Института гидродинамики СО АН СССР.

Рассматриваемая численная схема основана, как и другие одномерные модели неустановившегося движения воды, на полном уравнении Сен-Венана. Уравнения движения берутся в виде законов сохранения:

$$\frac{1}{g\omega} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \left[1 - \left(\frac{V}{C} \right)^2 \right] \frac{\partial Z}{\partial x} = \left[i_0 + \frac{1}{B} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \right)_{h=const} \right] \left[\left(\frac{V^2}{C} \right) - \frac{Q|Q|}{K^2} \right] \quad (3)$$

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

Система разностных уравнений решается методом прогонки (методом линейной факторизации). В результате прямой и обратной прогонки получают значения Q и Z вдоль всего русла или системы русел для очередного расчётного интервала времени.

Определение величин Q и Z для последней точки последнего участка производится на основе граничных условий, к которым добавляются граничные разностные уравнения. Далее производится обратная прогонка по соответствующим формулам.

Существуют явная или неявная разностные схемы. При явной схеме для каждого узла сетки происходит последовательное вычисление величин. При неявной схеме для каждого отдельно взятого расчетного интервала времени происходит последовательное решение систем уравнений. В результате решения каждой такой системы вычисляются характеристики потока во всех узлах данного слоя в моделируемой области (x, t) , во всех створах бьефа в данный расчетный момент времени t (Грушевский М.С., 1982).

Институтом гидродинамики была составлена компьютерная программа, с помощью которой можно рассчитать русло без разветвлений или простейшую схему русел: слияние двух речных русел или раздвоение. Программа позволяет учитывать боковой приток или отток, либо сосредоточенный приток (отток) на границах расчётных участков, либо равномерный распределённый по длине участка.

Указанная программа, составленная А.Ф. Воеводиным, широко апробировалась в ГГИ расчетами, как для конкретных объектов, так и для гипотетических русел простейшей формы и позволила получить целый ряд интересных научных результатов (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015). В настоящее время программа усовершенствована: она позволяет рассчитывать более сложное русло – “древовидный граф”, а также русло с “кольцами” – река с дельтой, острова в реке и т.д. Один из вариантов этой программы предусматривает возможность учёта так называемых “внутренних граничных условий” (гидроузлы, насосные станции) (Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., 1980).

2.5. Исходная информация для расчета неустановившегося движения воды.

Объем и качество исходных данных, необходимых для формирования информационной базы для моделирования, определяются: спецификой расчетного объекта, заданной пользователем точностью расчета, характером неустановившегося движения и типом используемого метода (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015).

Входная информация для расчета по модели неустановившегося движения воды (численная схема Института гидродинамики) включает в себя:

1. Длины расчетных участков
2. Значения расчетных интервалов времени и шагов по длине
3. Морфометрические характеристики русла
4. Характеристики гидравлического сопротивления

5. Начальные и граничные условия

6. Боковой приток и отток.

Сначала необходимо *разбить выбранный объект на расчетные участки*. Принимается, что в пределах этих участков закономерность изменения морфометрических и гидравлических характеристик русла однородна.

Существует ряд положений, которыми необходимо руководствоваться при разбивке объекта на расчетные участки (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015):

1. В пределах участка не допускается резкое изменение глубины (пороги) или ширины русла. Иначе назначаются дополнительные границы участков. Также дополнительная кривая назначается при резко выраженном неустановившемся движении воды в створе возмущения (гидротехнические сооружения, обуславливающие волны попусков) также назначается граница участков.
2. Граница участков назначается в створах впадения притоков, так как они оказывают большое влияние на расход воды в основном речном потоке.
3. Для границ участков желательно наличие данных натурных наблюдений: кривые расходов и уровней воды.

Для русел с поймой сечение должно быть перпендикулярно потоку не только в главном русле, но и на пойме. При сложном строении поймы и небольшом её заполнении задание исходной информации существенно усложняется (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015).

Следующая задача – *выбор расчетных интервалов времени (Δt) и шагов по длине (Δx)*. Количество расчетных шагов по длине в строгих методах обычно принимается целым и пропорциональным длине расчетного участка. При этом, чем больше выражен неустановившейся режим движения воды, тем расчетный участок разбивается на большее количество расчетных шагов по длине.

При выборе расчетного интервала времени важно выбирать в период резких изменений расходов воды при прохождении волн паводков и половодий меньший временной интервал, чтобы продолжительность явления в 10-20 раз превосходила расчетный интервал. Однако, при малых временных интервалах возрастает трудоемкость расчетов.

Морфометрические характеристики задаются на границах расчетных участках. Принимается, что на протяжении всего расчетного участка морфометрические параметры изменяются плавно от верхнего расчетного створа к нижнему. Профиль дна задаётся в пределах расчётного участка прямолинейным.

Исходя из предположения, что площади живого сечения по длине расчетного участка изменяются линейно, как и профиль речного дна, считается, что объём воды на расчётном участке будет равняться произведению полусуммы площадей живых сечений на концах участка на длину участка. Следовательно приращение объёма воды на участке (положительное или отрицательное) за расчетный интервал времени равен произведению полусуммы приращений площадей на концах участка за этот же интервал времени на ту же длину участка (Грушевская М.С., 1969).

Модель предоставляет возможность задания бокового притока и оттока. Боковой приток/отток задается либо как сосредоточенный, либо как распределенный поток. Сосредоточенный приток задается гидрографом на границе двух смежных расчетных участков так как должен быть привязан к конкретному створу. Это либо впадение другой реки, либо сброс вод в исследуемый водопоток. Сосредоточенный отток задается аналогичным. В качестве сосредоточенного оттока может рассматриваться водозабор или случай бифуркации русла. Распределенный приток и отток задается по всей длине расчетного участка в виде расхода воды на единицу длины (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015). Это ручьи и небольшие реки, на которых нет пунктов наблюдений, но которые имеют большое влияние на расход в основной реке. Часто для упрощения задачи боковым притоком и оттоком пренебрегают.

Задание начальных и граничных условий – главное условие для моделирования. В качестве начальных условий задается установившееся движение воды. При этом задается начальный расход Q_0 и уровень свободной поверхности Z_0 для каждого из назначенных створов. Чтобы задать установившееся движение на кривых расходов и уровней (каждого створа) выделяется некий продолжительный период, для которого характерен постоянный расход или уровень воды. Например, для расчетов волны летне-осеннего паводка, в качестве такого периода выбирается предшествующий паводку период летней межени (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015).

В качестве граничных условия на входном створе задается гидрограф $Q=f(t)$, а в замыкающем – ход уровней воды $Z=f(t)$. Делается это для того, чтобы увязать систему расход-уровень, и получить в результате для каждого расчетного створа как расход, так и уровень. Однако, иногда и на входном створе может также задаваться кривая хода уровней.

Также для моделирования необходимо задать параметры модели. Самый сложный функционально зависимый параметр – это гидравлический коэффициент трения n , определяемый обратным путем по одной из следующих формул:

формула Маннинга: $C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$ (5);

формула Агроскина: $C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R$ (6),

где R – гидравлический радиус
, а C – коэффициент Шези.

Коэффициент Шези C может быть определен из гидравлической формулы расхода воды $Q = \omega C \sqrt{Ri}$, где ω – площадь живого сечения, i – уклон русла. Как было сказано ранее коэффициент сопротивления n является функционально зависимым параметром от определяемых в результате расчета характеристик. В этом заключается одна из основных проблем моделирования неустановившегося движения воды. Однако, и предлагаемые значения по таблицам Срибного и Карасева далеки от естественных условий. В данной работе коэффициент n был рассчитан обратным путем по формуле Маннинга с использованием данных натурных наблюдений с гидрологических постов и полевых данных для рек Тосны и Ардона.

Глава 3. Создание информационной базы для моделирования и расчета.

Данные с постов на реке **Ока** были получены из гидрологического ежегодника. Данные были взяты по следующим постам: г. Калуга, г.Кашира, с. Половское за год средней водности 1978 за период с марта по май. В качестве бокового притока рассматривались реки Таруса, Протва и Нара, которые впадают в Оку на первом участке (до поста г.Кашира). Были взяты ежедневные расходы воды, уровни воды, данные по измеренным расходам воды для получения морфометрических характеристик (уровень и расход воды, ширина и глубина русла, площадь поперечного сечения, скорость течения) (табл.1).

Таблица 1. Пример таблицы измеренных расходов воды р.Ока пост г.Калуга 1978г.

№ измерения	Дата	Состояние русла	Уровень воды, м	Расход воды, м ³ /с	Площадь поперечного сечения, м ²	Скорость течения, м/с	Макс. скорость, м/с	Ширина русла, м	Глубина средняя, м	Глубина макс., м
12	25.03	св	133	545	840	0,65	0,82	239	4,04	4,99

Необходимая информация по реке **Тосна** была частично взята из гидрологического ежегодника за 2008 год (год средней водности) для поста с.Тосно, а именно ход расходов и уровней воды за выбранный период времени. Остальные данные для створа 1, 2 и 3 были получены в результате полевых изысканий, проведенных 22 сентября 2017 года. Состав бригады: Амаро Медина Д.Р., Боронина А.С., Иванин В.И., Коваленко А.А., Немчинов Е.О., Распутина В.А. Оборудование: Нивелир, тренога, 2 нивелирные рейки, колья, вешки, рулетка 2 м, трос 50 м маркированный через 0,5 м, вертушка ГР - 21, водомерная рейка. Была проведена нивелирная съемка с целью получения отметок урезных колев трех створов в абсолютной системе координат; получены отметки дна на участках, рассчитаны гидрометрические характеристики, получены расходы воды и определены скорости.

Для данной работы по реке **Ардон** и проведения последующих расчетов были взяты данные для стока 1% обеспеченности из проектных изыскательных работ за 2015 года, в ходе которых было проведено специализированное рекогносцировочное обследование реки Ардон и водосбора реки Баддон селевой направленности (Инженерно-гидрологические изыскания по р. Баддон ...2015).

С помощью программы Google Earth были получены расстояния между постами, рассчитаны уклоны на каждом из расчетных участков. Используя полученную информацию и учитывая морфометрические данные, был рассчитан коэффициент гидравлического сопротивления русла.

3.1. Выбор расчетных участков.

Как было сказано ранее, для моделирования неустановившегося движения воды на реке **Оке** было выбрано 2 расчетных участка (рис.4, 5). Первый участок расположен между постами Калуга и Кашира. Длина участка составляет 184 050 м. На этом участке в Оку впадает 3 крупных притока: Таруса, Протва и Нара. Их суммарный расход учитывается в модели. Второй участок от поста Кашира до поста Половское. Длина 269 200 м. Информация по притокам на данном участке отсутствует.

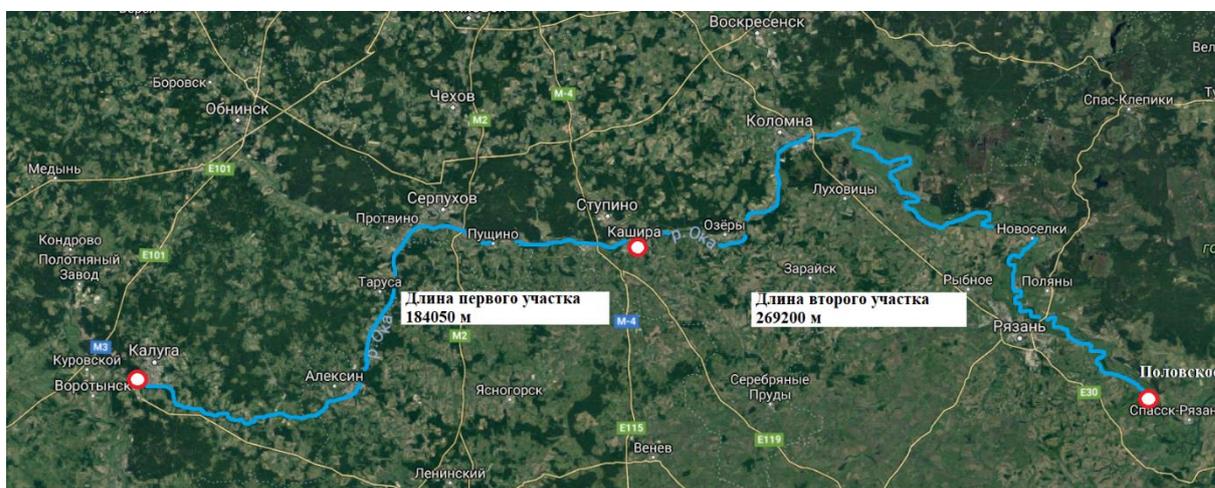


Рисунок 4. Схематичное изображение расчетных участков реки Ока (google.maps).

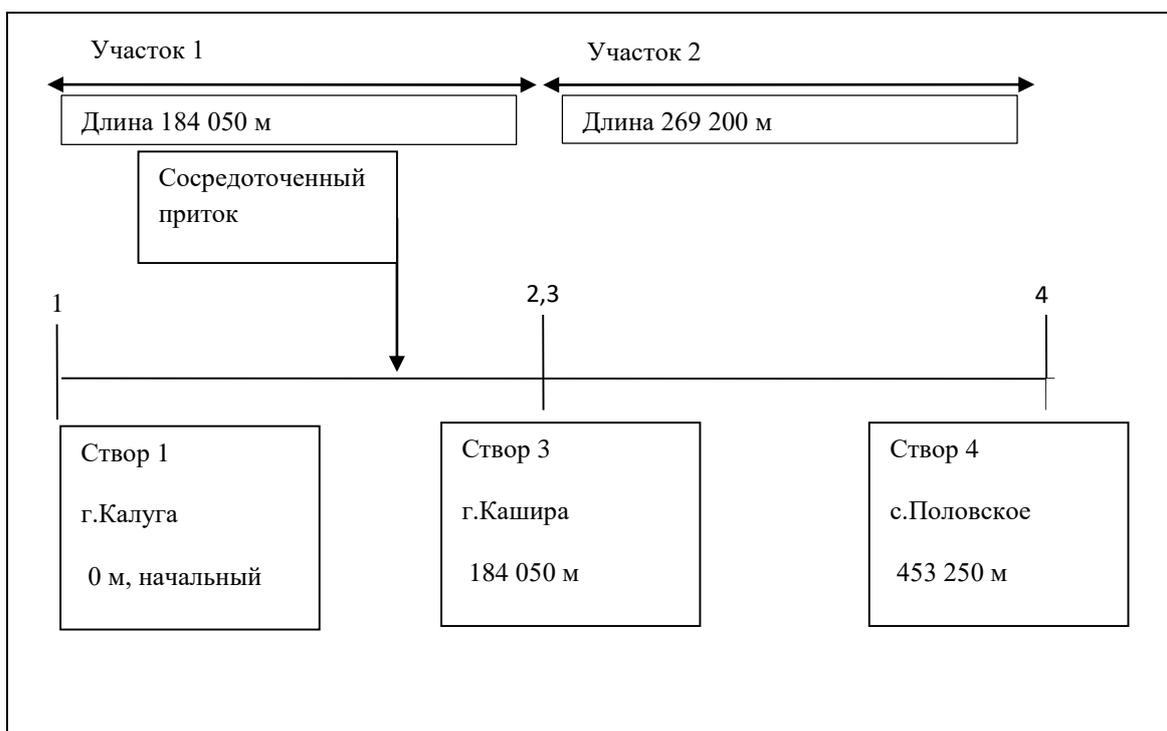


Рисунок 5. Схематизация модели неустановившегося движения воды для участка р. Ока.

Таблица 2. Характеристики расчетных участков р. Ока

№ участка	1	2
Длина участка, м	184 050	269 200
Кол-во интервалов	10	20
Протяженность расчетного интервала, м	18 405	13 460

Для моделирования неустановившегося движения воды на реке **Тосна** было выбрано 2 расчетных участка (рис.6, 7). Первый участок расположен между постами ст. Тосно и Створ 1. Длина участка составляет 20 346 м. Второй участок от поста Створ 1 до поста Створ 2. Длина 1 047 м. На всем протяжении выбранного участка значимые притоки отсутствуют.

Таблица 3. Характеристики расчетных участков р. Тосна

№ участка	1	2
Длина участка, м	3 054	1 047
Кол-во интервалов	10	10
Протяженность расчетного интервала, м	305,4	104,7

Чтобы смоделировать неустановившееся движение воды на реке **Ардон** было выбрано 5 расчетных участков (рис.8, 9). Общая длина участка р. Ардон составляет 2 000 м. На участке 3 в Ардон впадает река Баддон.



Рисунок 8. Схематичное изображение расчетного участка реки Ардон с выделенными входным и замыкающим створами (google.maps).

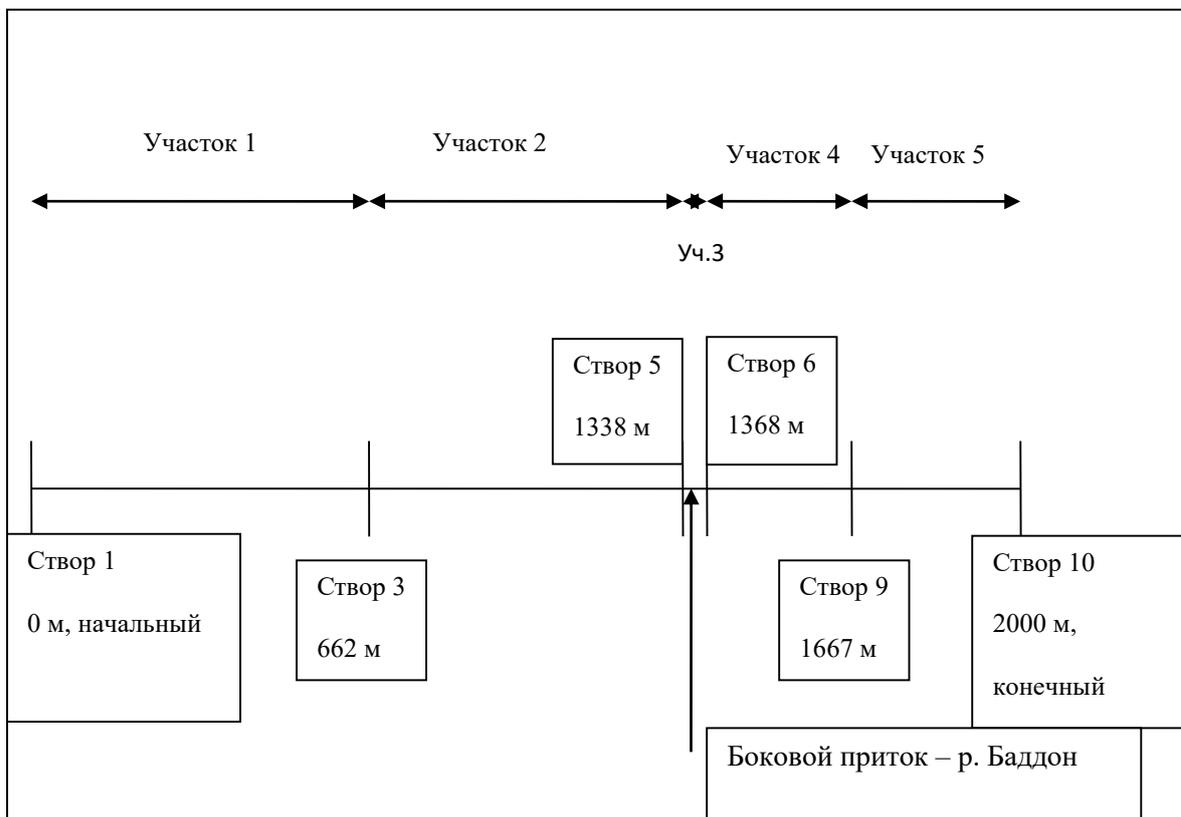


Рисунок 9. Схематизация модели неустановившегося движения воды для участка р. Ардон.

Таблица 4. Характеристики расчетных участков р. Ардон

№ участка	1	2	3	4	5
Длина участка, м	682	656	30	299	333
Кол-во интервалов	30	30	30	30	30
Протяженность расчетного интервала, м	22,73	21,87	1	9,97	11,1

3.2. Выбор расчетных интервалов по времени и длине.

В качестве расчетного периода для реки Оки был выбран период весеннего половодья начиная с 1 марта и заканчивая 31 мая 1978 года, то есть 92 суток. Расчетный шаг по времени был выбран равным 1 суткам, так как временное разрешение данных натурных наблюдений не превышает одних суток, то есть данные – ежесуточные.

Для реки Тосна был взят период осеннего паводка с 1 августа по 9 октября, что составляет 70 суток. Расчетный шаг по времени был выбран равным 1 суткам.

Продолжительность расчета на реке Ардон была равной 360 часов период с 1 по 15 августа. В качестве исходных данных принимался средние суточные расходы воды по данным.

Расчетный шаг по длине участков рек Ока, Тосна и Ардон представлены в таблицах 2, 3 и 4 соответственно.

3.3. Гидравлико-морфометрические характеристики.

Сначала на основе полевых данных и данных с гидрологических постов были построены продольные профили дна для каждой из рек (рис. 10, 11, 12).

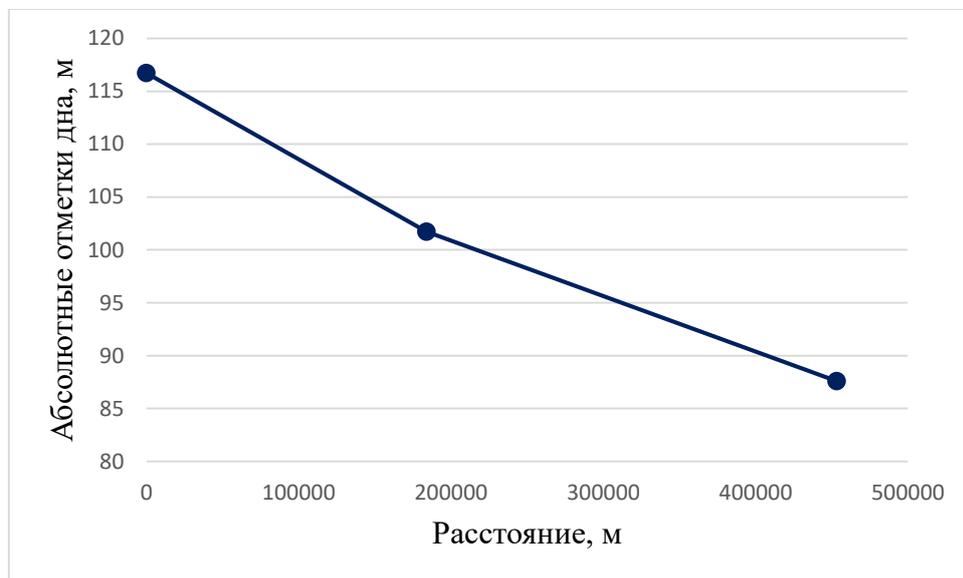


Рисунок 10. Продольный профиль дна р. Ока

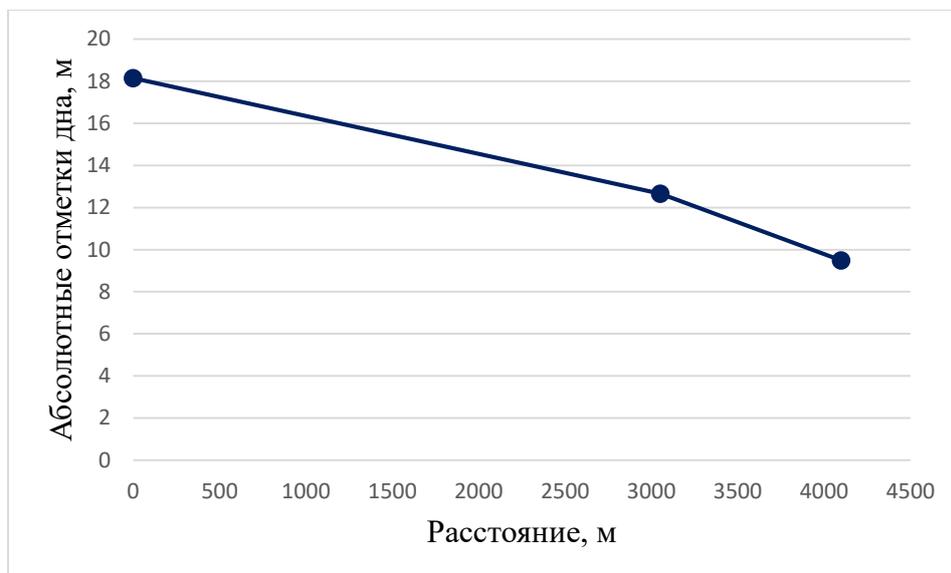


Рисунок 11. Продольный профиль дна р. Тосна

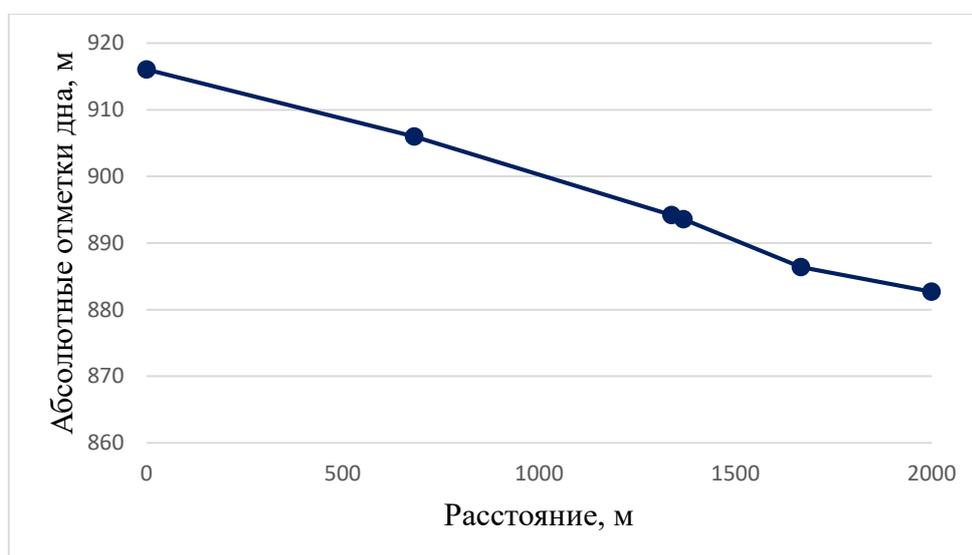


Рисунок 12. Продольный профиль дна р. Ардон

На основе этих данных были рассчитаны уклоны на каждом из расчетных участков, что в дальнейшем пригодилось для расчета коэффициента гидравлического сопротивления русла n . (глава 3.5)

Основываясь на данных из измеренных расходов воды для реки Оки были построены графики зависимости ширины русла от его средней глубины. Для рек Тосны и Ардона использовались значения ширины русла и средней глубины, полученные путем полевых изысканий. Примеры графически изображенных точечных графиков для первого поста каждой из трех рек представлены на рисунках 13-15. (Остальные находятся в Приложении)

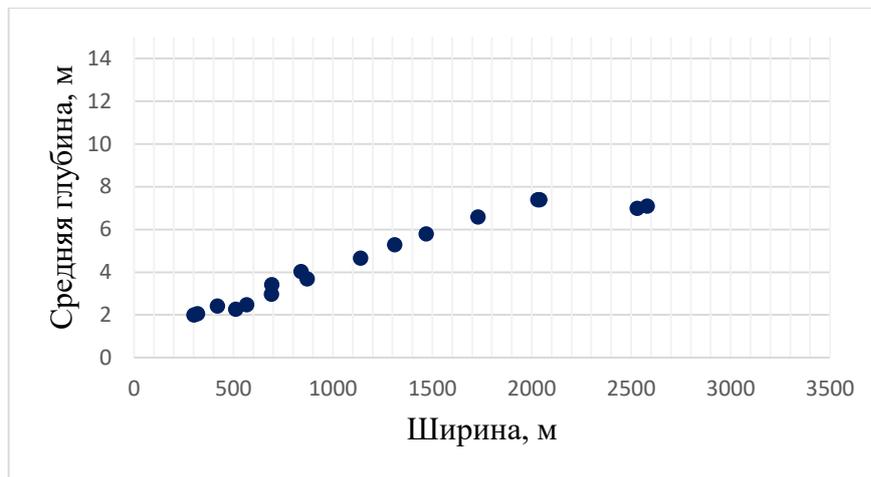


Рисунок 13. Точечный график зависимости глубины от ширины, г. Калуга, р. Ока.

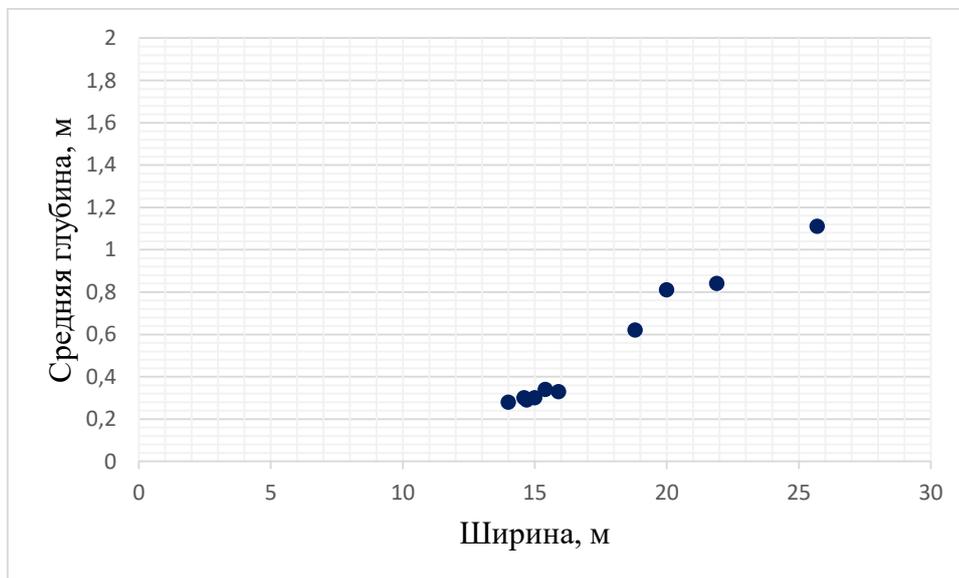


Рисунок 16. Точечный график зависимости глубины от ширины, Створ 1, р. Тосна.

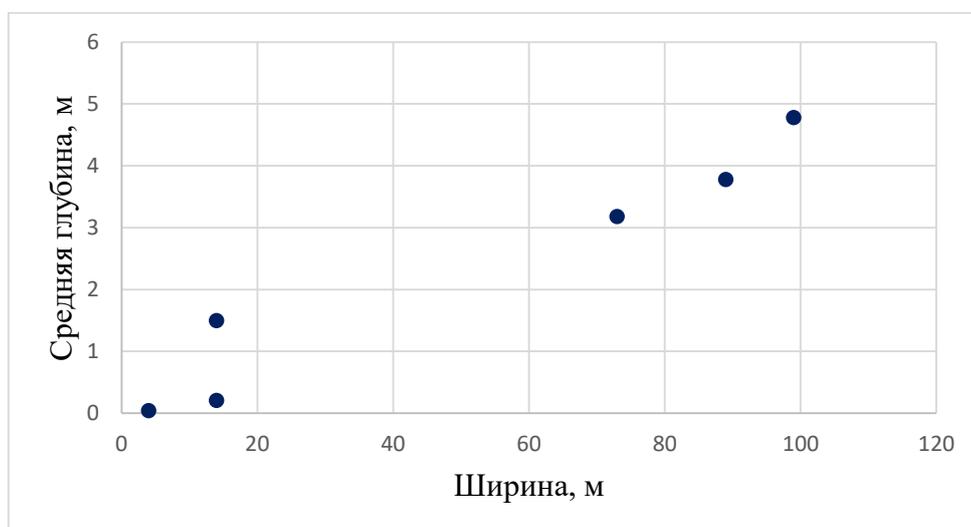


Рисунок 17. Точечный график зависимости глубины от ширины, Створ 1, р. Ардон.

Измерения для некоторых створов на реке Тосна были взяты из полевых материалов, поэтому являются точечными.

На основе вышеизложенных данных были построены поперечные профили каждого из постов (Приложение). Для реки Ока графики поперечных профилей выглядят симметрично, так как строятся они на основе зависимости «средняя глубина – ширина русла». Основные точки перегиба на поперечных профилях занесены в тело модели в соответствующий массив морфометрии.

3.4. Задание начальных и граничных условий.

При расчете по р. Оки был выделен период с 1 по 16 марта (расчет волны весеннего половодья 1978 г.). Для р. Тосна – с 1 по 25 августа (для расчета летне-осеннего паводка 2008 г.), а для реки Ардон – с 1 по 24 час. Колебания гидрографов в пределах выделенных периодов минимальны, движение условно установившееся, поэтому средние расходы и уровни воды за данные периоды принимаются в качестве начальных условий (табл. 1).

Таблица 5. Начальные условия при моделировании по рекам

Река	Пост	Начальные условия	
		Q ₀ , м ³ /с	H ₀ , м
р. Ока	Калуга	132,2	1,2066
	Кашира	143,0	1,0510
	Половское	292,4	0,9041
р. Тосна	Створ 1	2,1	1,5
	Створ 2	2,1	1,5
	Створ 3	2,1	1,5
р. Ардон	Створ 1	15,2	916,71
	Створ 2	15,2	906,65
	Створ 3	15,2	894,81
	Створ 4	16,2	894,12
	Створ 5	16,2	887,80
	Створ 6	16,2	883,71

При внесении данных в оболочку модели в качестве бокового притока для р. Ока были взяты данные по постам Таруса, Протва и Нара. На протяжении рассматриваемых участков на р. Тосна значимых притоков не наблюдалось. Для р. Ардон в качестве бокового притока были использованы данные р. Баддон.

При внесении данных в оболочку модели информация об уровнях заносится в абсолютных отметках Балтийской системы высот (БС) или же в принятых условных отметках (Ардон). Для реки Тосна начальные и граничные были взяты по посту с. Тосно из-за недостаточного количества информации и наличия единственного поста (с. Тосно). Так как Створ 3 (замыкающий створ) расположен в 21 393 м от поста с. Тосно, время добегания соответственных расходов и уровней составляет меньше суток, а расстояние между постами мало, то было принято решение брать данные по посту с. Тосно.

В качестве граничных условий были выбраны:

- гидрограф стока на створе г. Калуга (р. Ока)
- график хода уровня воды на створе с. Половское (р. Ока)
- гидрограф стока на створе с. Тосно(р. Тосна)
- график хода уровня воды на створе с. Тосно (р. Тосна)
- гидрограф стока на створе Створ 1(р.Ардон)
- график хода уровня воды на створе Створ б (р. Ардон)

В оболочку модели граничные условия вводятся в виде ряд «время-расход» или «время-уровень». Эти ряды получаются путем выделения на построенных графиках основных характерных точек перегиба.

Ниже представлены гидрографы на входном створе для расчета волны половодья на р. Ока и для расчета волны дождевых паводков на реках Тосна и Ардон (рис.18-21) (графики хода уровней представлены в приложении). Графики с промежуточного створа на р.Ока пост г.Кашира представлен для анализа полученных результатов расчета.

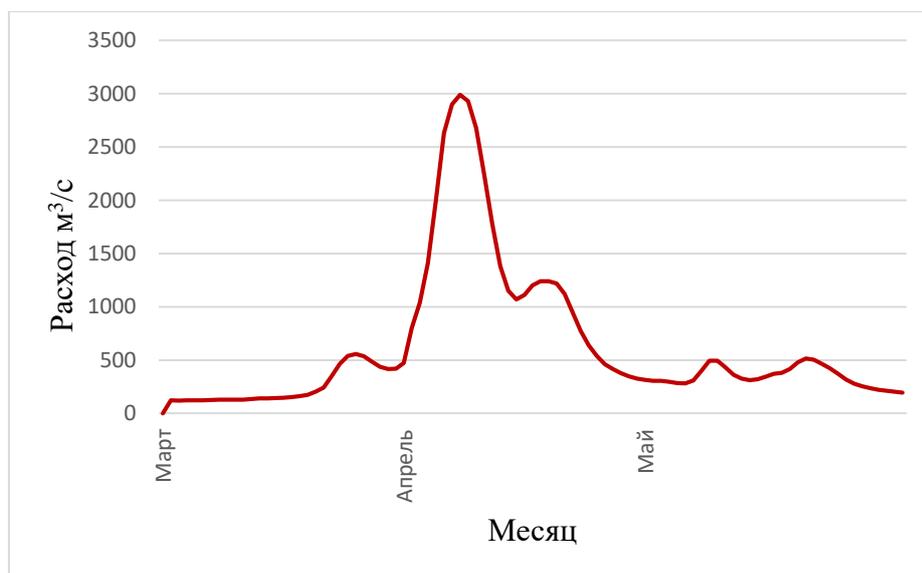


Рисунок 18. Гидрограф стока р. Ока (г.Калуга), 1978 г.

3.5. Задание бокового притока и оттока.

При внесении данных в оболочку модели в качестве бокового притока для р. Ока были взяты данные по постам Таруса, Протва и Нара, а для реки Ардон в качестве притока была задана река Баддон.

Приток задавался в определенный створ (древовидная схема). На р. Ока таким был створ у поста г.Кашира, на р. Ардон – Створ 6 на 3 расчетном участке, гидрографы сосредоточенного бокового притока для каждой реки продемонстрированы на рис. 22-25. На протяжении расчетного участка на р. Оке имеются и другие притоки, но, к сожалению, стационарных наблюдений на них не ведется, следовательно, отсутствие натуральных данных может повлиять на точность расчета.

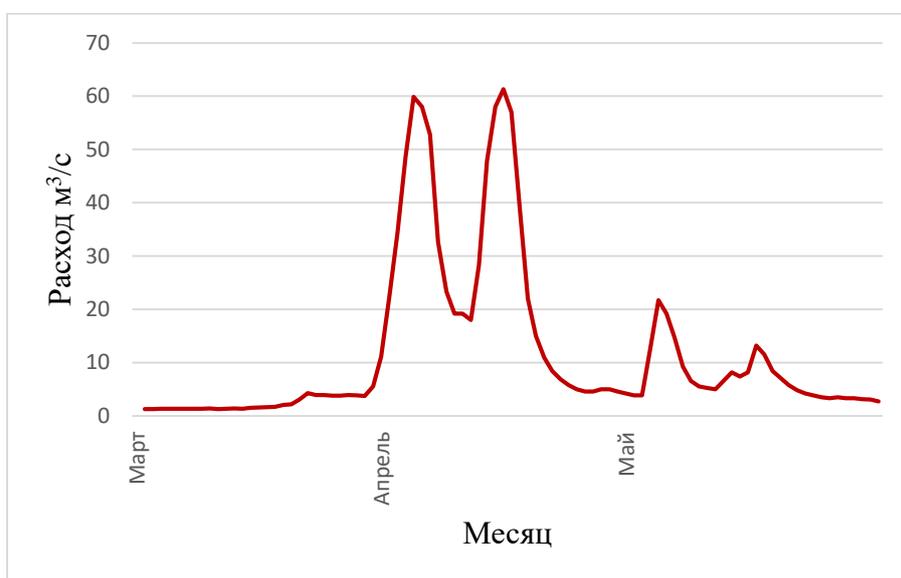


Рисунок 22. Гидрограф бокового сосредоточенного притока для р. Ока (р.Таруса)

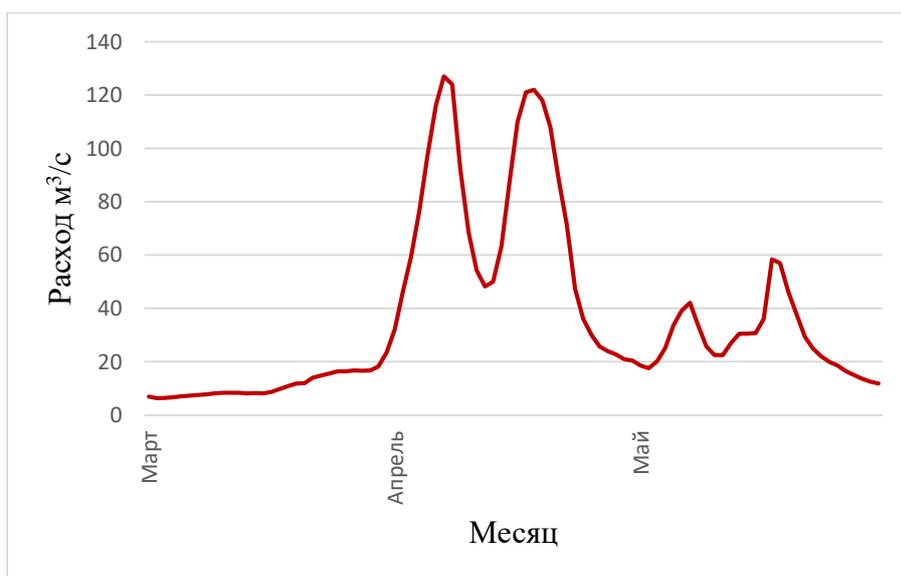


Рисунок 23. Гидрограф бокового сосредоточенного притока для р. Ока (р.Протва)

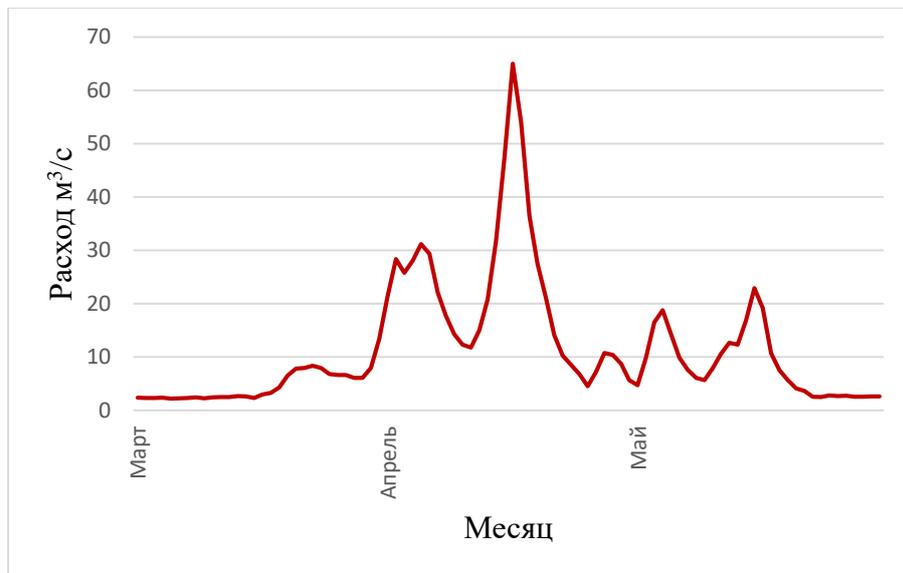


Рисунок 24. Гидрограф бокового сосредоточенного притока для р. Ока (р.Нара)



Рисунок 25. Гидрограф бокового сосредоточенного притока для р. Ардон (р.Баддон)

3.6. Задание коэффициентов шероховатости.

Коэффициенты шероховатости (гидравлического сопротивления) русла определялись обратным путем, опираясь на данные измеренных расходов воды и полевые данные. Так как в оболочку модели задается один коэффициент шероховатости на всю длину расчетного участка, условно принимается, что гидравлическое сопротивление русла реки является постоянным на всем протяжении расчетного участка (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015). Более того, значение коэффициента шероховатости усредняется по всему поперечному сечению русла, что, конечно же, не соответствует реальным условиям и зависит от степени наполнения русла и характера поймы (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015).

Расчет коэффициентов шероховатости производился по следующим формулам:

$$\text{формула Маннинга: } C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

$$\text{формула Шези: } Q = \omega C \sqrt{Ri} \quad (8)$$

где R – гидравлический радиус, принимаемый равным средней глубине русла, C – коэффициент Шези, ω – площадь поперечного сечения, i – уклон расчетного участка в долях от единицы, Q – расход воды.

Выражая из этих формул n , получаем

$$n = \frac{\omega R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{Q} = \frac{R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (9)$$

где V – скорость течения воды, также указанная в таблице об измеренных расходах воды. Таким образом, мы получаем зависимость коэффициента шероховатости от средней глубины (гидравлический радиус), уклона, и скорости течения. Так как уклон принимается постоянным на протяжении всего расчетного участка, во внимание принимаются только средняя глубина потока и его скорость. Средняя глубина определялась по формуле $H_{\text{ср}} = \omega / B$, где ω – площадь поперечного сечения русла, B – ширина.

Были рассчитаны коэффициенты шероховатости для каждой из таблиц ИРВ, а также основываясь на полевых данных, полученных в ходе изыскательных работ. Коэффициенты шероховатости n представлены в табл. 6.

Таблица 6. Коэффициенты шероховатости n для каждого из расчетных участков.

Расчетный период	01.03.1978- 31.05.1978		01.08.2008- 09.10.2008		01.08.2015-15.08.2015 (360 часов)				
Река	Ока		Тосна		Ардон				
Замыкающий створ расчетного участка	Кашира	Половское	Створ 1	Створ 2	Створ 2	Створ 3	Створ 4	Створ 5	Створ 6
n	0.030	0.035	0.023	0.023	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080

Полученные таким путем коэффициенты шероховатости могут не соответствовать действительности. Во-первых, он принимается постоянным как по всей длине расчетного участка, так и по всему поперечному сечению русла. Во-вторых, принимается, что уклон по всей длине расчетного участка постоянен. Однако, в случае одномерного моделирования данные допущения необходимы, и поэтому целесообразно проводить корректировку параметров, рассчитанных аналитически, основываясь на анализе полученных результатов моделирования.

3.7. Внесение данных в оболочку модели.

Вся исходная информация задаётся в виде следующих друг за другом массивов чисел. При задании информации используются условные числа, которые используются для разделения массивов информации или отделения одной вершины от другой.

Образец правильного задания массивов информации в модель взят из статьи Виноградовой Т.А., Никифоровской В.С. «О математическом моделировании формирования процессов тепломассопереноса в речных и озерно-речных системах, 2015» и представлена ниже.

Массив I содержит информацию общую для всей системы и связанную с заданием временных характеристик, а также ряда констант:

i – номер варианта расчёта;

M – число отрезков;

t_0 – начальный момент времени, с которого начинается расчёт;

t_k – конечный момент времени, до которого ведётся расчёт;

τ – шаг по времени;

Δt_1 – интервал времени выдачи результатов по створам;

Δt_2 – интервал времени выдачи результатов по всем точкам;

m_t – масштаб времени перехода в сек;

m_b – число узлов системы русел;

N_1, \dots, N_M – таблица числа интервалов на 1, ..., M отрезках соответственно;

L_1, \dots, L_M – таблица длин 1, ..., M отрезков соответственно.

Массив G содержит гидравлические и морфометрические характеристики отрезков.

Информация задаётся в следующей последовательности:

l – длина таблицы аргументов $Z_g(x)$;

$x_1 = 0, x_2, \dots, x_L = L$ – таблица координат створов на отрезке;

Z_{d1}, \dots, Z_{dl} – таблица отметок дна водотока в створах;

f_1 – условное число, равное 1 или 2. Если $f_1 = 1$, то модуль расхода K рассчитывается по формулам; если $f_1 = 2$, то модуль расхода K задан таблицей $K(x)$.

В первом случае вслед за условным числом ($f_1 = 1$) для всех створов, начиная с первого, задаётся следующая информация:

f_2 – условное число, равное 1 или 2. Если $f_2 = 1$, то коэффициент Шези рассчитывается по формуле Маннинга, если $f_2 = 2$, по формуле Агроскина;

n – коэффициент шероховатости;

x_1 – координата 1-го створа;

l – длина таблицы аргументов h ;

h_1, \dots, h_l – таблица аргументов значений функции $V(h)$;

V_1, \dots, V_l – таблица значений функции V 1-го створа;

x_2 – координата 2-го створа;

l – длина таблицы аргументов h ;

h_1, \dots, h_l – таблица аргументов значений функции $V(h)$;

V_1, \dots, V_l – таблица значений функции V 2-го створа;

и т.д. для всех створов 1-го участка.

Во втором случае после условного числа ($f_2 = 1$) задаётся следующая информация:

x_1 – координата 1-го створа;

l – длина таблицы аргументов h_b ;

h_1, \dots, h_l – таблица аргументов значений функции $V(h)$;

V_1, \dots, V_l – таблица значений функции V 1-го створа;

l – длина таблицы аргументов h_k ;

h_1, \dots, h_l – таблица аргументов значений функции $V(h)$;

K_1, \dots, K_l – таблица значений функции K 1-го створа;

и т.д. последовательно для всех остальных створов 1-го участка.

Далее следует информация по участкам 2, 3, ..., M аналогично предыдущему.

Массив K_u содержит информацию о вершинах всей системы в следующем порядке:

номер вершины;

тип вершины;

информация о граничном условии в вершине в зависимости от типа вершины.

Затем следует аналогичная информация для всех остальных вершин системы.

Массив M_x содержит информацию о координатах створов, в которых необходимо задать начальные условия и иметь результаты расчёта, включая концевые точки отрезков.

L – общее число створов, включая концевые точки отрезков;

$x_1 = 0, x_2, \dots, x_n = L_1$ – таблица координат створов на 1-ом отрезке;

$x_1 = 0, x_2, \dots, x_n = L_2$ – таблица координат створов на 2-ом отрезке;

и т.д. последовательно для всех остальных отрезков.

Массив M_q содержит информацию о боковой приточности $q(t)$ для всех отрезков системы:

l – длина таблицы аргументов t_q ;

t_1, \dots, t_l – таблица аргументов значений q ;

q_1, \dots, q_l – таблица значений боковой приточности q на 1-ом отрезке;

l – длина таблицы аргументов t_q ;

t_1, \dots, t_l – таблица аргументов значений q ;

q_1, \dots, q_l – таблица значений боковой приточности q на 2-ом отрезке;

и т.д. последовательно для всех остальных отрезков.

Массив M_Q содержит начальные значения Q . Длина массива определяется числом расчетных точек для всей системы. Информация может задаваться двумя способами:

Если $t_0 = 0$, то задаются значения Q во всех створах, включая концевые в полном соответствии с заданием массива M_x последовательно для всех отрезков системы, начиная с 1-го.

Если $t_0 > 0$, т.е. имеет место продолжение счёта, то значения Q задаются во всех расчётных точках при $t = t_0$ в предположении, что все расчётные точки занумерованы сквозной для всех отрезков нумерацией, начиная с нуля.

Массив M_Z содержит начальные значения Z , задание аналогично заданию Q .

Массив M_T содержит начальные значения T , задание аналогично заданию Q .

Массив Z_p содержит начальные значения уровней воды в вершинах системы:

Z_1, Z_2, \dots, Z_{mb} .

Массив pr содержит информацию о номерах левых и правых концов отрезков, начиная с 1-го. Эта информация однозначно определяет структуру системы:

номера концов 1-го отрезка: i лев
 i прав
номера концов 2-го отрезка: i лев
 i прав

и т.д. последовательно для всех остальных отрезков.

3.8. Вывод результатов.

Программой предусмотрен вывод результатов во всех точках. Вывод производится в формате .text, что позволяет проводить дальнейшие расчеты и построения графиков в других программах. Через интервалы Δt выдаётся такая информация, как:

1. момент времени t ;
2. общее число участков M ;
3. порядковый номер точки, начиная с нуля;
4. координата точки и соответствующие ей значения переменных во всех точках для M отрезков. На печать выдаются $h, Q, Z, V, B, \omega, K, C, R, Fr$ (табл.7).

Таблица 7. Пример вывода результата расчета в оболочке модели.

НАЧАЛО РАСЧЕТА									
ВРЕМЯ	B	СЕК	T=	1					
I	X	Z	Q	V	W	B	K	R	FR
1	0	916,892	15,2	1,013	15,01	27,13	126,22	0,5518	0,189
2	682	906,718	15,207	1,069	14,217	27,71	113,71	0,5118	0,227
3	0	906,718	15,207	1,069	14,217	27,71	113,71	0,5118	0,227
4	656	894,901	15,172	1,157	12,915	22,65	110,53	0,5665	0,239
5	0	894,901	16,172	1,235	12,915	22,65	110,53	0,5665	0,273
6	30	894,262	16,169	1,155	13,791	28,8	105,39	0,478	0,284
7	0	894,262	16,169	1,155	13,791	28,8	105,39	0,478	0,284
8	299	887,774	16,124	1,032	15,271	22,64	146,1	0,6696	0,161
9	0	887,774	16,124	1,032	15,271	22,64	146,1	0,6696	0,161
10	333	883,46	15,877	1,285	11,923	24,89	90,99	0,4771	0,351

Глава 4. Результаты моделирования

4.1 Коэффициент соответствия NS

Чтобы провести сравнительный анализ смоделированных и наблюдаемых данных был использован критерий соответствия NS (Nash Sutcliffe model efficiency coefficient) (Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V., 1970). Использование критерия рекомендовано Американской ассоциацией гражданских инженеров для оценки состоятельности моделей стока, а также используется Всемирной метеорологической организацией для сравнительного анализа моделей (Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А., 2015 г.).

Коэффициент соответствия Nash-Sutcliffe используется для оценки адекватности результатов моделирования речного стока. Рассчитывается NS по следующей формуле:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (10)$$

, где Q_o - наблюдаемое и Q_m - рассчитанное значение расхода воды в момент времени.

Величина коэффициента Nash-Sutcliffe может изменяться в пределах от $-\infty$ до 1. Значение коэффициента равного 1 ($NS=1$) соответствует идеальному совпадению рассчитанного и наблюдаемого гидрографов стока, то есть модельный расчет признается полностью адекватным. Разделяют следующие оценки критерия:

1. $NS < 0$ → говорит о сильном расхождении пиков гидрографа во времени или несовпадении по фазам, модель считается несостоятельной ;
2. $0 \leq NS \leq 0.3$ → плохое “качество” моделирования;
3. $0.3 < NS \leq 0.7$ → хорошее совпадение рассчитанных и наблюдаемых величин речного стока, модель хорошо воспроизводит динамику моделируемой величины;
4. $0.7 < NS < 1$ → практически полное совпадение рассчитанного и наблюдаемого гидрографов стока.

При всем выше сказанном нужно иметь в виду, что критерий соответствия имеет свои недостатки. Так например, в случае совпадения расчетного и наблюдаемого пиков или в случае продолжительного паводка критерий NS будет завышать оценку модели. С другой стороны, при малой продолжительности паводка на малой реке (1 сутки) и при таком же хронологическом несовпадении результатов с наблюдаемыми значениями

критерий соответствия будет иметь малые или же вовсе отрицательные значения (Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А., 2015 г.).

4.2. Моделирование на основе рассчитанных коэффициентов шероховатости.

Так как в качестве граничных условий использовался гидрограф для верхнего створа и график хода уровня для нижнего створа, интереснее всего сравнить смоделированные данные по промежуточному створу с натурными данными, которые не вводились в модель. Натурные данные по промежуточному створу есть только на р. Оке г. Кашира. Полученные уровни воды для верхнего створа, а также гидрограф для нижнего, также принимались во внимание (результаты расчетов по ним представлены в приложении). Результаты моделирования с использованием рассчитанных обратным путем коэффициентов (таблица 6) шероховатости представлены ниже.

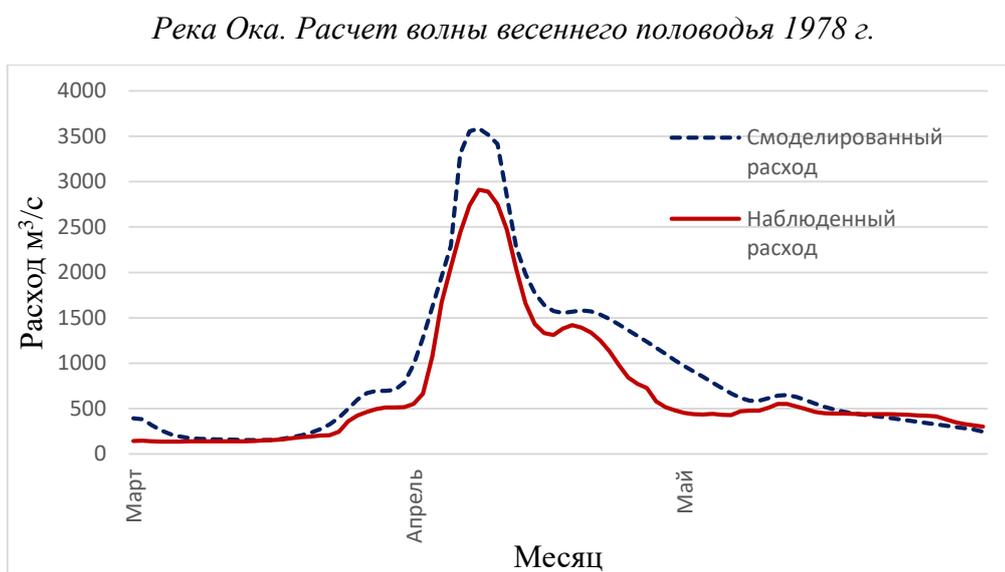


Рисунок 26. Рассчитанные и наблюдаемые расходы воды р. Ока, г. Кашира, 1978 г.

Критерий соответствия NS при данном результате моделирования равен 0,86 для расчета расходов на р.Ока пост г. Кашира. Ориентируясь на изложенную выше градацию значений NS результат расчета в целом можно считать удовлетворительными. Однако, при визуальной оценке графика при совпадении координаты времени заметно несоответствие ординат пиков половодья, поэтому необходимо произвести работу над поиском более подходящих коэффициентов гидравлического сопротивления русла.

Река Тосна. Расчет волны дождевого паводка 2008 г.

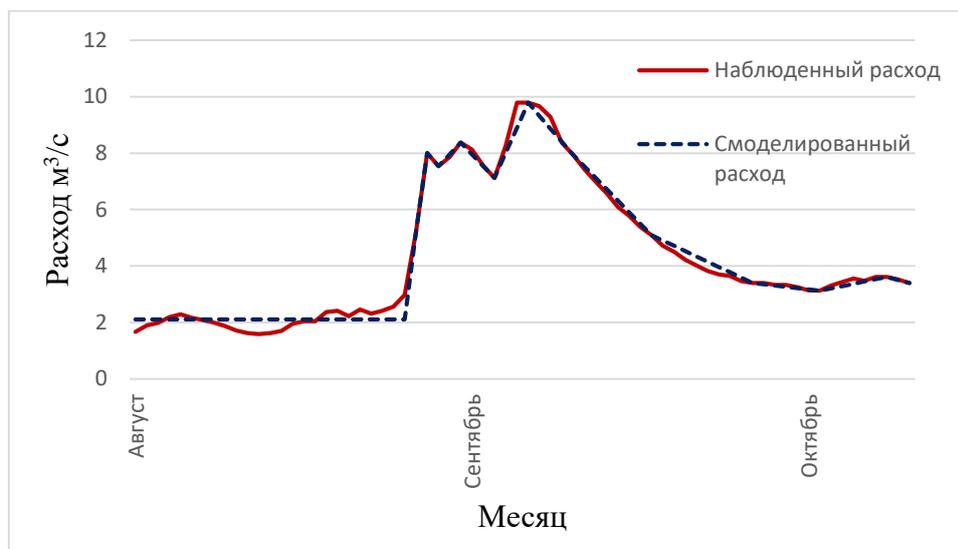


Рисунок 27. Рассчитанные и наблюдаемые расходы воды р. Тосна, Створ 1, 2008 г.

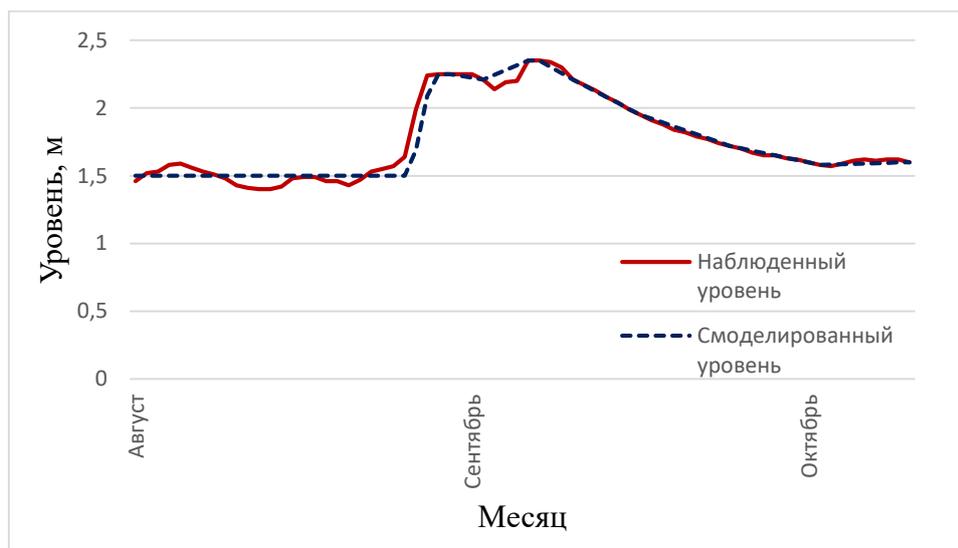


Рисунок 28. Рассчитанные и наблюдаемые уровни воды р. Тосна, Створ 3, 2008 г.

Критерий соответствия NS для р. Тосна при данном результате моделирования принимает значения, равные 0,99 и 0,96 для расчета расходов и уровней соответственно. Ординаты пиков паводков практически совпадают, также наблюдается хорошее совпадение по координате времени. Поэтому можно считать результаты моделирования, основанные на рассчитанных по натурным данным коэффициентах шероховатости, более чем удовлетворительными.

Река Ардон. Расчет волны дождевого паводка 2015 г.

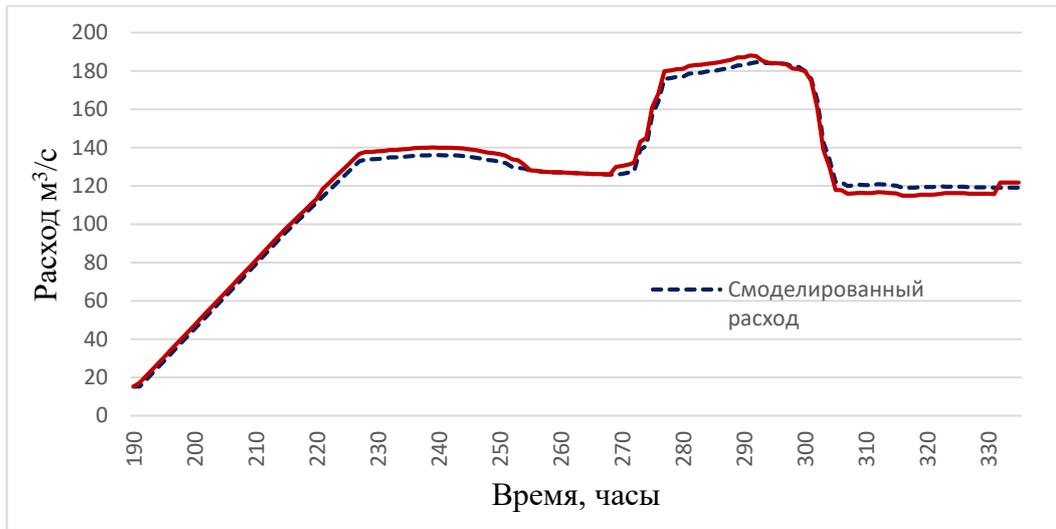


Рисунок 29. Рассчитанные и наблюдаемые расходы воды р. Ардон, Створ 1, 2015 г.

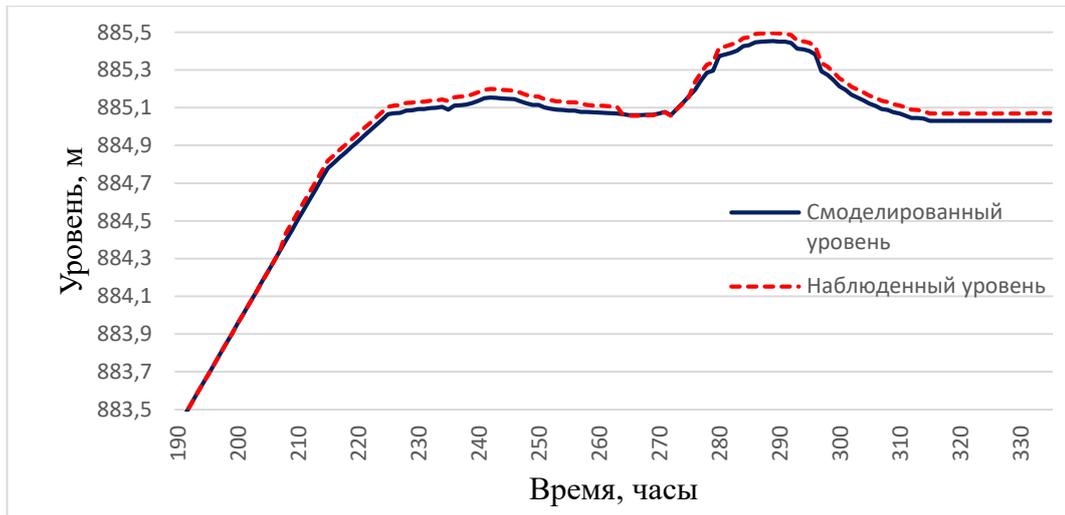


Рисунок 30. Рассчитанные и наблюдаемые уровни воды р. Ардон, Створ 6, 2015 г.

Критерий соответствия NS для р. Ардон при данном результате моделирования принимает значения, равные 0,97 и 0,99 для расчета расходов и уровней соответственно. Поэтому можно считать результаты моделирования, основанные на рассчитанных по натурным данным коэффициентах шероховатости, более чем удовлетворительными.

4.3. Корректировка параметров модели.

С целью улучшения результатов моделирования необходимо было провести повторный расчет с откалиброванными параметрами. Корректировка коэффициентов шероховатости производилась, исходя из следующего положения: основным следствием варьирования данного коэффициента является изменение расчетных уровней воды на верхних и промежуточных створах (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015 г). Таким образом, для увеличения уровней и расходов воды на вышележащем створе необходимо увеличить значение коэффициента шероховатости на расчетном участке, что приведет к увеличению коэффициента сопротивления на этом участке. Это происходит из-за так называемого «торможения» потока воды. Увеличение сил трения и уменьшение скоростей течения и приводят к увеличению уровня.

Наиболее низкое значение критерия соответствия NS получилось на реке Ока г.Кашира. Для наибольшего совпадения ординат пиков весеннего половодья было решено увеличить коэффициент сопротивления для двух расчетных участков с 0,030 и 0,035 до 0,040 и 0,045 соответственно. Результат представлен на рисунке 31.

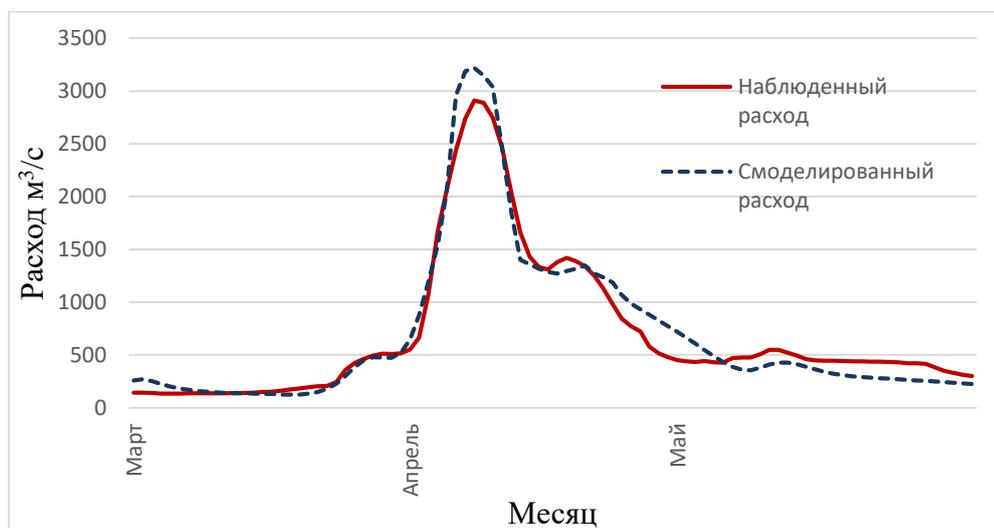


Рисунок 31. Рассчитанные и наблюдаемые расходы воды р. Ока, г. Кашира, 1978 г.

Критерий соответствия NS для р. Ока пост г.Кашира при данных коэффициентах сопротивления составляет 0,95. Результат моделирования можно считать удовлетворительным, хотя заметно несовпадение ординат пиков половодья.

Заключение

В ходе данной работы были выполнены все поставленные задачи и достигнута основная цель: рассчитать с помощью одномерного моделирования, на основе численной схемы Института гидродинамики, гидравлические параметры исследуемых объектов – рек Ока, Тосна (равнинные) и Ардон (горная река).

Был представлен аналитический обзор методов расчета неустановившегося движения воды, выбора численной схемы, а также были рассмотрены основные требования и допущения к исходной информации для модели.

Для формирования информационной базы для моделирования для разных рек (горных и равнинных) использовался разный объем исходных данных, чтобы посмотреть все возможности модели. Так для реки Оки были взяты данные из гидрологических ежегодников. Для реки Тосна большая часть исходной информации была получена благодаря полевым изысканиям. Данные по Ардону были полностью взяты из полевых изысканий, а также именно на этой реке расчетный шаг по времени составил не одни сутки, как в предыдущих случаях, а 1 час. Также были определены все гидрологические и гидравлико-морфометрические характеристики исследуемых объектов.

Были представлены основные результаты моделирования неустановившегося движения воды для трех рек. Приведены расчеты коэффициента сопротивления русла на основе данных натурных наблюдений и данных, полученных в результате полевых изысканий. Выяснено, что коэффициент сопротивления для горной реки выше (0,080 для Ардона), чем для равнинных рек (0,023 и 0,045 для Тосны и Оки, соответственно).

Далее представлены результаты моделирования, основанные на заданных параметрах (морфометрических характеристик створов и расчетных участков, рассчитанных коэффициентах сопротивления). Произведен сравнительный анализ смоделированных и натурных данных на основе расчета критерия соответствия Nash-Sutcliffe. Получено, что критерий соответствия NS изменяется в пределах от 0,95 до 0,99. Представлено описание корректировки параметров, результаты повторных расчетов и итоговые результаты моделирования. В итоге, для каждого исследуемого объекта представлены рекомендуемые для одномерного моделирования значения гидравлических параметров.

В результате работы было выявлено следующее: одномерная модель неустановившегося движения воды можно использовать при расчетах как для объектов с наличием натурных данных, так и для объектов с минимальным количеством исходной информации и наличии точечных измерений. Но, разумеется, чем большее количество исходной информации находится в оболочке модели, тем надежнее и качественнее получаются результаты расчетов.

Список литературы

Монографии:

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. «Современные методы в гидрологии», издательство Академия, Москва, 2008 г.
2. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С. «Рабочий алгоритм расчёта на ЭВМ гидравлического режима с учётом атмосферного давления, ветра, плотности (температуры и солёности) воды». Новосибирск, 1980.
3. Грушевский М.С. «Волны попусков и паводков в реках». – Л.: Гидрометеиздат, 1969.
4. Грушевский М.С. «Неустановившееся движение воды в реках и каналах». – Л.: Гидрометеиздат, 1982.

Статьи в сборниках:

1. Виноградова Т.А., Никифоровская В.С. О математическом моделировании формирования процессов тепломассопереноса в речных и озерно-речных системах. Тр. IV Всесоюз. науч. конф. Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Москва, 15-18 сент. 2015, с.102-106.
2. Лопатин Д. В., Болтрамович С. Ф., Сытина И. А., «Об эрозионно-аккумулятивных циклах в долине реки Тосны бассейна р. Невы. / Двадцать четвёртое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов» г. Барнаул, 5-9 октября 2009 г.: доклады и сообщения. — Барнаул: изд-во АлтГУ, 2009. — 238 с.

Фондовые материалы:

1. Инженерно-гидрологические изыскания по р. Баддон и моделирование прохождения наносоводных паводков на сопряжении рек Баддон — Ардон для разработки рабочей документации по объекту: Защита территории в долине р. Баддон (Зарамагская ГЭС-1), 2015 г.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. — Л.: Гидрометеиздат, 1965
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 8. Северный Кавказ. — Гидрометиздат, 1973. — 448 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 10. Верхне-Волжский район / под ред. В. П. Шабан. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. — 528 с.

Статьи в журналах:

1. Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А. «Анализ соответствия критериев качества моделирования процессов формирования стока малых рек», Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки, 2015 г.
2. Каропова Е. Д., Федоров Г. А., «Моделирование неустановившегося движения воды в нижнем бьефе Богучанской ГЭС», 2008 г.
3. Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles", 1970.
4. Ahmad, S., Simonovic, S. P. Comparison of One-Dimensional and Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling Approaches For Red River Basin. Report to the International Joint Commission-Red River Basin Task Force, Ottawa, Washington 1-51, 1999.
5. Alvarado A. , Robinson D. One-Dimensional Versus Two-Dimensional Modeling, 2012.

Ресурсы сети Интернет:

1. ru.wikipedia.org
2. <https://www.google.ru/maps>
3. <https://www.google.com/earth/>

Приложение

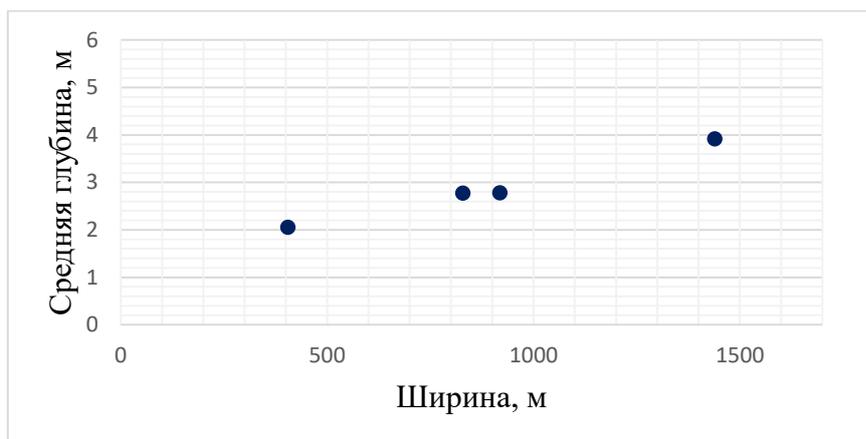


Рисунок 32. Точечный график зависимости глубины от ширины, г. Кашира, р. Ока

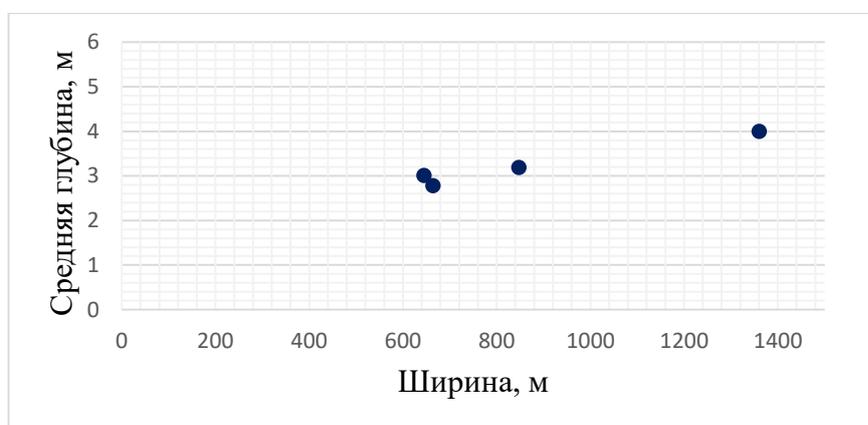


Рисунок 33. Точечный график зависимости глубины от ширины, с. Половское, р. Ока

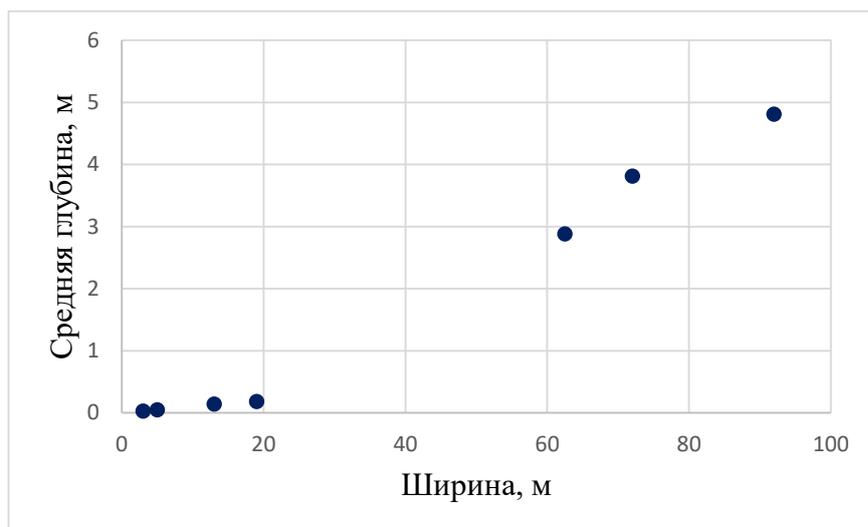


Рисунок 34. Точечный график зависимости глубины от ширины, Створ 2, р. Ардон

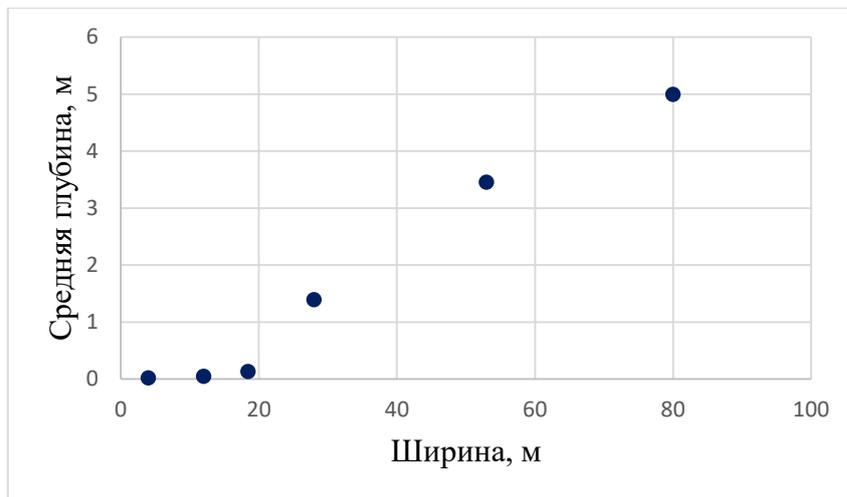


Рисунок 35. Точечный график зависимости глубины от ширины, Створ 3, р. Ардон

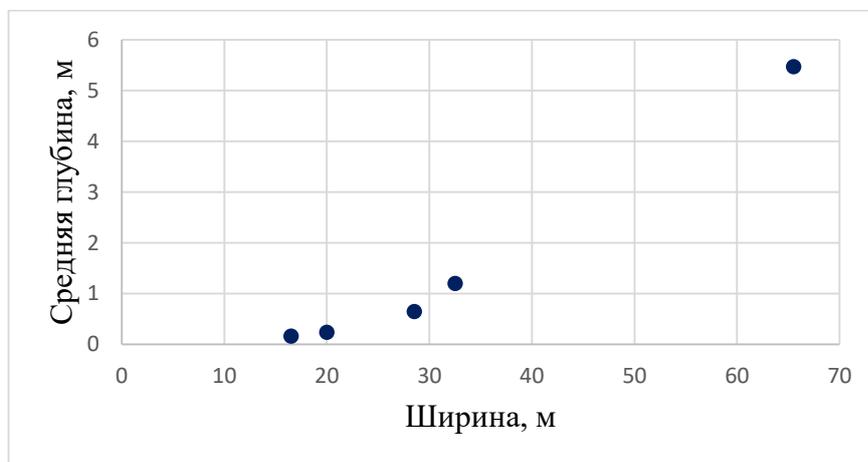


Рисунок 36. Точечный график зависимости глубины от ширины, Створ 4, р. Ардон

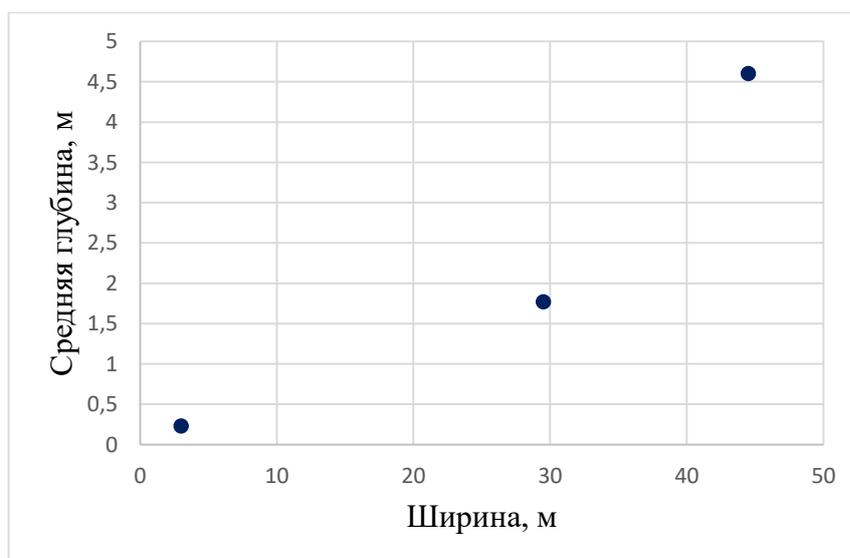


Рисунок 37. Точечный график зависимости глубины от ширины, Створ 5, р. Ардон

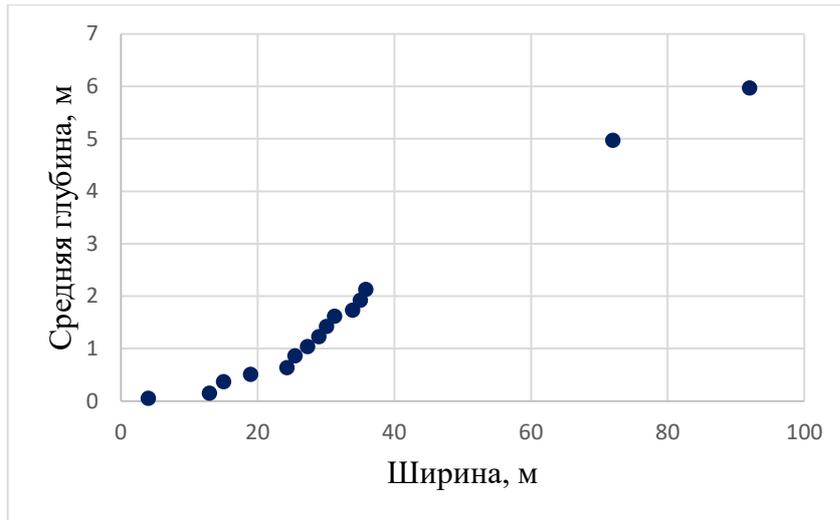


Рисунок 38. Точечный график зависимости глубины от ширины, Створ 6, р. Ардон



Рисунок 39. Поперечный профиль р.Ока, г.Калуга.



Рисунок 40. Поперечный профиль р.Ока, г.Кашира.

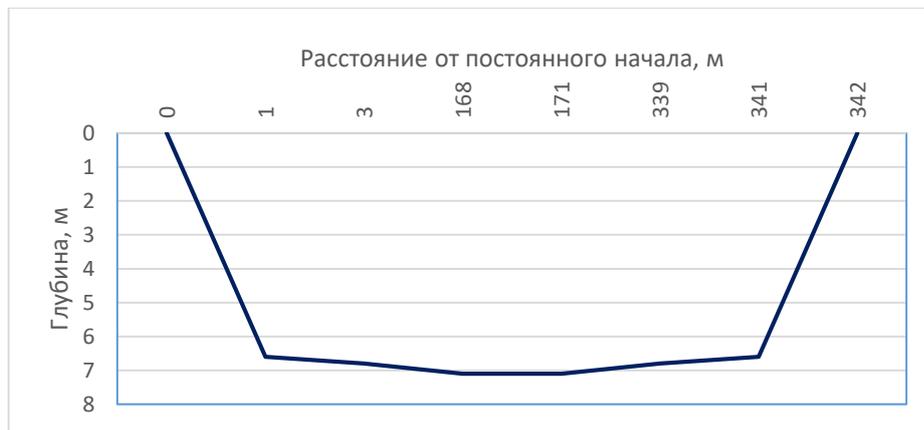


Рисунок 41. Поперечный профиль р.Ока, с.Половское.



Рисунок 42. Поперечный профиль р.Тосна, Створ 1.



Рисунок 43. Поперечный профиль р.Тосна, Створ 2.



Рисунок 44. Поперечный профиль р.Тосна, Створ 3.

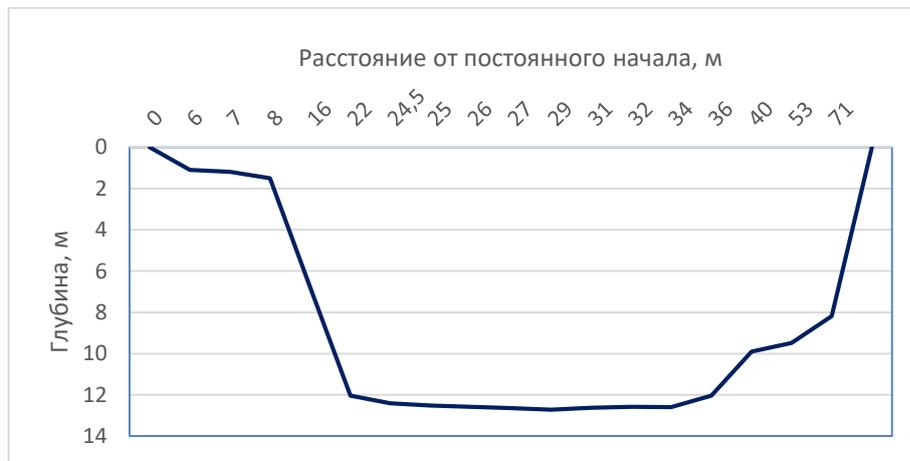


Рисунок 45. Поперечный профиль р.Ардон, Створ 1.



Рисунок 46. Поперечный профиль р.Ардон, Створ 2.

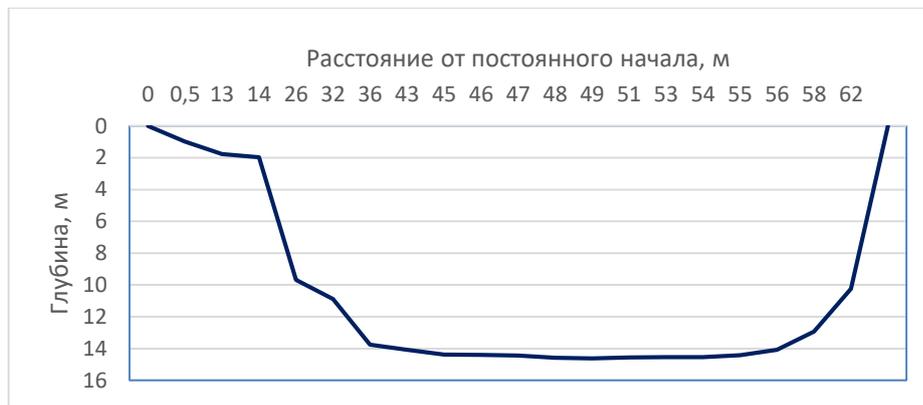


Рисунок 47. Поперечный профиль р.Ардон, Створ 3.

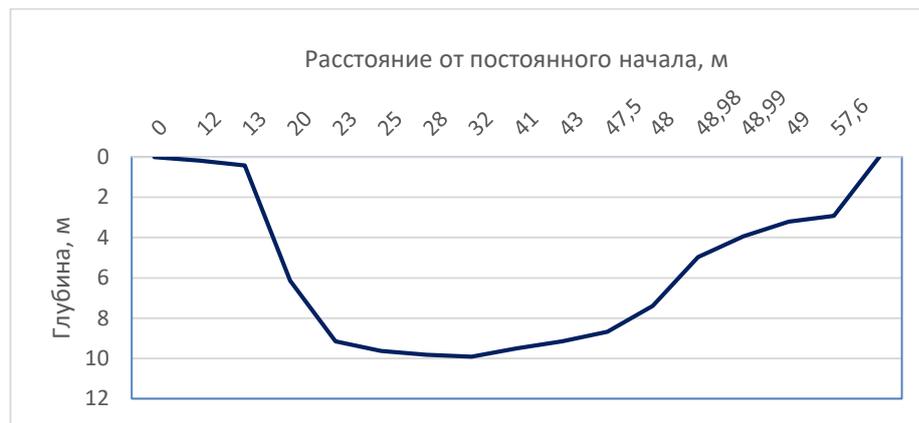


Рисунок 48. Поперечный профиль р.Ардон, Створ 4.



Рисунок 49. Поперечный профиль р.Ардон, Створ 5.

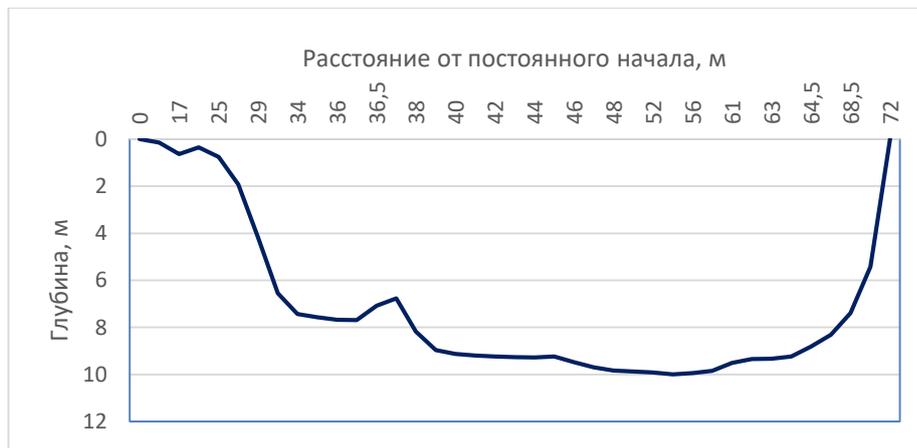


Рисунок 50. Поперечный профиль р.Ардон, Створ 6.

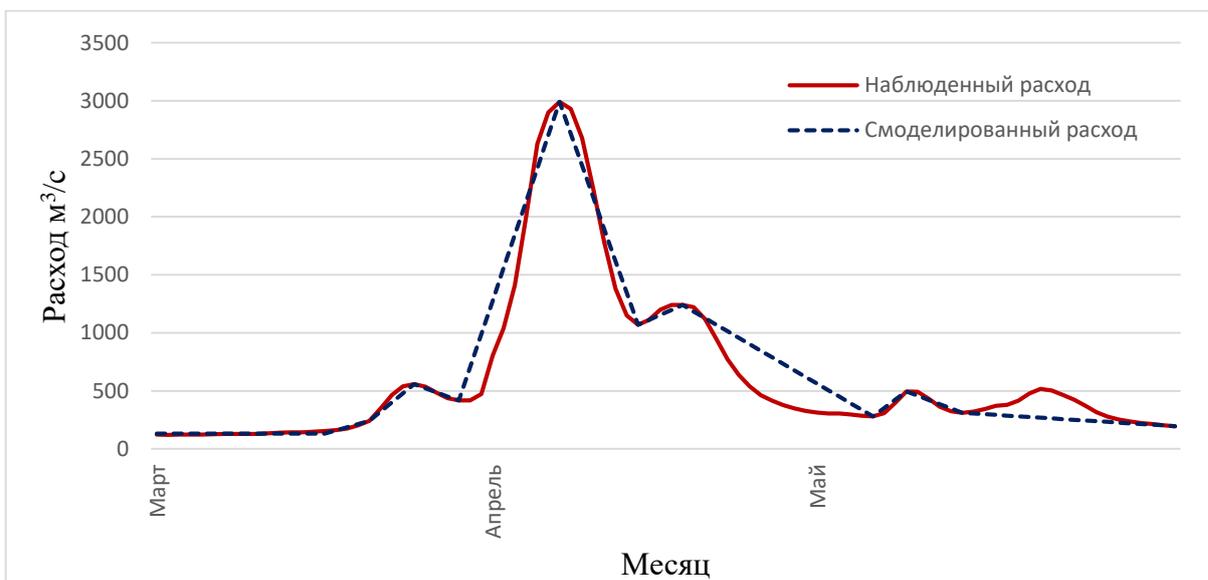


Рисунок 51. Рассчитанные и наблюдаемые расходы воды, р.Ока, г.Калуга.

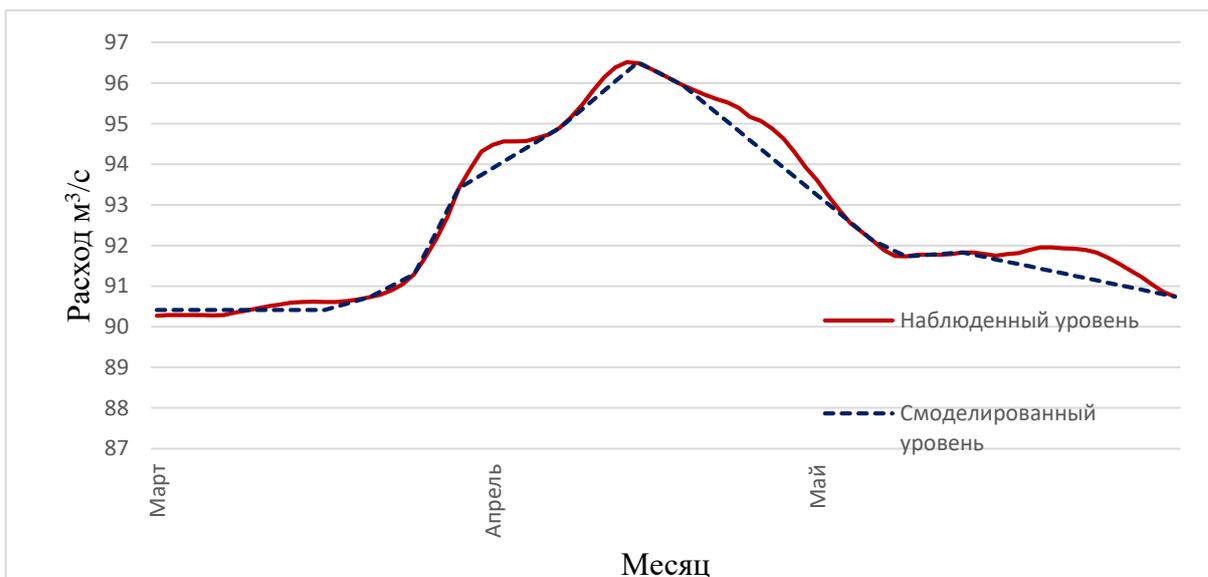


Рисунок 52. Рассчитанные и наблюдаемые уровни воды, р.Ока, с.Половское.

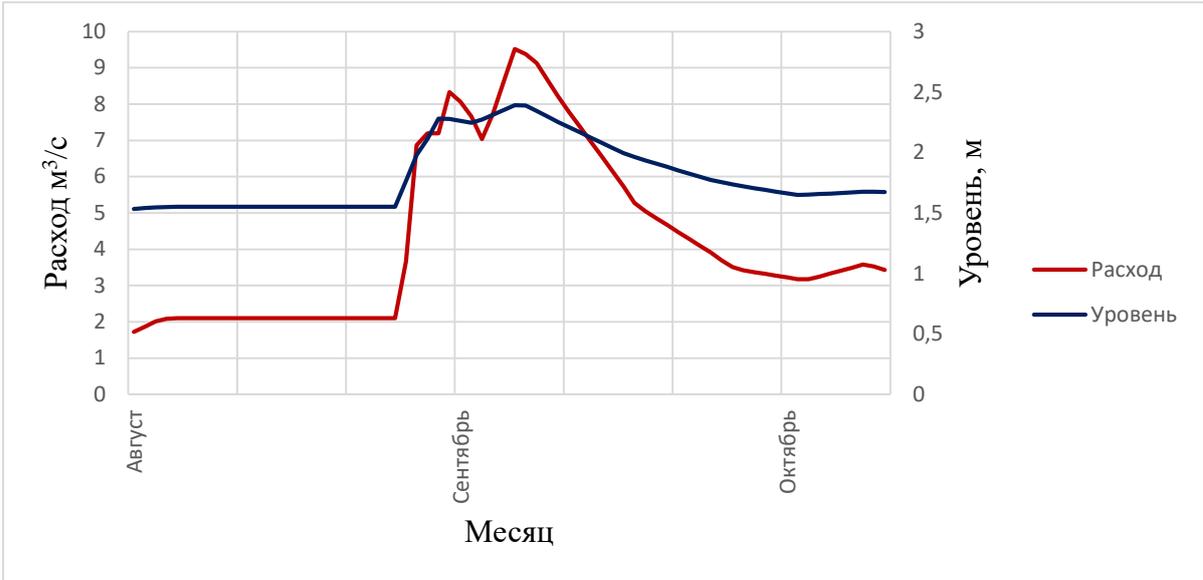


Рисунок 53. Рассчитанные расходы и уровни воды, р.Тосна, Створ 2.