



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему Прогнозирование стока рек
бассейна р. Сухоны

Исполнитель Кулаков Игорь Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«19» 02 2024г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

	Введение	3
1	Физико-географические условия бассейна р. Сухоны	4
1.1	Рельеф	4
1.2	Почвенный и растительный покров	7
1.3	Геологическое строение	9
1.4	Гидрогеологические условия	10
1.5	Климатические условия территории Вологодской области	11
2	Общая характеристика гидрографической сети и водного режима реки Сухоны	14
2.1	Гидрологическая характеристика реки Сухоны	15
2.2	Водный режим	20
3	Методики прогнозирования гидрологических характеристик	22
3.1	Методика прогнозирования стока рек водобалансовым методом	22
3.2	Статистические методы	25
3.3	Способы нелинейной тенденции	30
3.4	Методика динамического фонового прогноза изменения водности	35
4	Формирование базы данных для исследования	38
4.1	Гидрологические данные	40
4.2	Метеорологическая информация	48
5	Прогнозирование стока р. Сухоны	58
5.1	Водно-балансовый метод	58
5.2	Статистический метод	59
5.3	Способ нелинейной тенденции	64
5.4	Методика динамического фонового прогноза изменения водности	68
	Заключение	70
	Список использованных источников	71
	Приложения	73

Введение

Большая часть бассейна р. Сухоны расположена на территории центральной и восточной части Вологодской области.

Исследование диссертации направлено на изучение, разработку и апробацию подходов прогнозирования расходов воды на реке Сухона. Для её выполнения были использованы данные наблюдений 7 гидрологических постов и 3 метеорологических станций.

Работа включает в себя введение, пять глав, заключение, список использованных источников и приложение. В первой главе рассмотрены физико-географические условия исследуемого района: рельеф, почва и растительный покров, геологические и гидрогеологические условия. Во второй главе приведена общая характеристика гидрографической сети и водного режима реки Сухоны. Третья посвящена применяемым методикам прогнозирования гидрологических характеристик. В четвёртой главе описываются используемые гидрологические данные и метеорологическая информация. Пятая глава посвящена анализу апробации методов прогноза в бассейне р. Сухоны. В заключении представлен общий результат по выполненной работе и обобщённый вывод по всем главам.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- изучены процессы формирования речного стока на водосборе р. Сухона;
- сформирована база данных для исследования;
- изучены методы краткосрочного и долгосрочного прогнозирования речного стока;
- разработана и апробирована методика прогноза расходов воды на р. Сухона;
- разработаны рекомендации для эффективного прогнозирования речного стока на р. Сухона.

1 Физико-географические условия бассейна р. Сухоны

1.1 Рельеф

Рельеф Вологодской области весьма разнообразен. Здесь холмистые возвышенности чередуются с низменностями и грядами. Высота территории над уровнем моря составляет от 150 до 200 метров. Она значительно вытянута с запада на восток – 650 километров, а протяжённость области с севера на юг 385 километров. Геологическое строение Северного края в пределах его равнинной части характеризуется преобладанием платформенных структур и глубоким залеганием кристаллического фундамента, сформированного в архейских и протерозойских образованиях и перекрытого мощными толщами осадочных отложений.

В пределах Вологодчины выделяют три основных крупных форм рельефа: озерно-ледниковые низины, являющиеся днищами и ступенями террас, исчезнувших приледниковых водоёмов; моренные холмистые и волнистые равнины со сглаженными формами ледникового рельефа и с небольшой мощностью четвертичных отложений и последняя форма представлена ледниковыми аккумулятивными возвышенностями, которые сложены четвертичными ледниковыми отложениями.

Эти крупные комплексы форм рельефа осваиваются сетью речных долин, согласованно располагающихся по отношению к низменностям и возвышенностям. Облик современного рельефа сформировался в четвертичное время под действием покровных оледенений, но в нём всё ещё можно найти отражение геологической структуры дочетвертичного времени, литологического состава коренных пород, доледникового рельефа и, в определённой степени присутствуют новейшие тектонические движения.

Окончательное освобождение территории от покровного оледенения в разных частях области не совпадало друг с другом по времени. После ухода ледника сформированный им рельеф преобразовывался под воздействием поверхностных и подземных вод, склоновыми процессами и другими

внешними факторами, при этом, чем дальше преобразовывается ледниковый рельеф, тем сильнее он утрачивает свой первоначальный облик. Именно поэтому выделенные комплексы форм рельефа, расположенные в зонах распространения разных оледенений, имеют внешние различия.

В определённом соответствии с рельефом поверхности находится строение толщи рыхлых отложений. Озерно-ледниковые отложения, как правило, занимающие наиболее низкие территории, вытянуты в двух основных направлениях:

а) с северо-запада на юго-восток. Они распространяются от Онежского озера к Белому и Кубенскому озёрам, через устье реки Вологды в долину реки Лежи; от верховьев рек Суды, Чагоды и Андоги к Рыбинскому водохранилищу; от реки Вожеги к Кубенскому озеру;

б) с юго-запада на северо-восток вдоль долины реки Сухоны.

Такое распространение поддаётся контролю структурами кристаллического фундамента платформы: юго-восточное направление низин совпадает с Карельской складчатой протерозойской системой и её «ответвлением» – Воже-Лачским грабеном.

Сухонская низина примерно «сдвинута» на 500 – 700 метров к северо-западу от Рослятинского авлакогена и протянулась параллельно ему, совпадая с Грязовецко-Тарногским прогибом. Молого-Шекснинская низменность нашла отражение в рельефе поверхности с позднего карбона (касимовское время), а в поздней перми (татарское время) очертания впадины были уже чёткими.

Структурное оформление Присухонской низины (эрозионно-тектонической депрессии), судя по всему, произошло одновременно с параллельно ей ориентированной Ярославско-Костромской низменностью в поздней меловой системе.

В высотном отношении моренные равнины между низинами и возвышенностями занимают промежуточное положение. Они имеют незначительную мощность чехла четвертичных отложений и занимают практически всю оставшуюся часть области.

Юго-восточные районы области были сформированы под влиянием московской морены вместе с флювиогляциальными и покровными отложениями. Так, сформировалось два уровня рельефа:

а) придолинный уровень, совпадающий с участками распространения погребённых озерно-ледниковых отложений. Его высота колеблется от 120 до 150 метров. Его отличительная черта – это плоскоравнинным и плоско холмистый рельеф.

б) верхний уровень приурочен к водоразделам с высотой более 150 метров и отличается моренным и моренно-эрозионным рельефом. В стадияльных конечно-моренных образованиях, таких как: окраины Северных Увалов, правобережье Средней и Нижней Сухоны, на территории Важско-Сухонско-Двинском водоразделе наблюдаются скопления моренно-камовых холмов[12, 13].

1.2 Почвенный и растительный покров

Разнообразие почвенного покрова Вологодской области связано с изменениями в пределах территории почвообразующих пород, климата, растительности, рельефа и залегания почвенно-грунтовых вод.

Преимущественно почвы на большей части территории подзолистые, супесчаные или суглинистые, местами песчаные или торфянистые. В изменении почвенного покрова легко отследить широтную зональность: севернее 64° широты почвы глеево-подзолистые; южнее, до 60° широты, – типичные подзолистые. «Под луговой растительностью, наоборот, происходит накопление органических и минеральных веществ в верхних горизонтах. Этот процесс накопления свойственен почвам суходольных и пойменных лугов. Дерново-подзолистые почвы развиваются на водоразделах, там, где луговая растительность сменила лесную, или же под разреженным пологом мелколиственных лесов. Значительные площади этих лесов распаханы. Климатические условия территории и распространение лесной растительности способствует увлажнению и выщелачиванию почвогрунтов» [10].

«Подзолистые почвы развиваются там, где были или сохранились хвойные леса. Формируются они в процессе растворения и вымывания минеральных соединений под влиянием кислот, образующиеся при разложении органических остатков. Данный тип почв обладает очень низким естественным плодородием, так как имеет высокую кислотность, небольшое содержание гумуса, фосфора и калия» [10].

«Ограниченное распространение по области имеют дерновые почвы, потому что формируются только под травянистой растительностью, как правило, в местах неглубокого залегания карбонатных моренных отложений. Образуются они в процессе накопления гумуса и минеральных веществ в верхней части почв. Считается, что почвы дернового типа наиболее плодородные в области» [10].

«На водоразделах при смене лесной растительности на луговую или под разреженным пологом мелколиственных лесов активное распространение получили дерново-подзолистые почвы. Значительные площади этих лесов распаханы. Дерново-подзолистые почвы распространяются повсеместно в пределах территории» [10].

«Северный и восточный районы области благоприятны для образования болотно-подзолистых почв, формирующихся под древесной растительностью в понижениях, под влиянием длительного переувлажнения. В агрономическом отношении данный тип считается наименее плодородным» [10].

«В понижении рельефа западной части области, в условиях постоянного застоя почвенно-грунтовых вод и под влаголюбивой растительностью, распространены болотные почвы. Наиболее плодородны среди болотных почв являются торфяные почвы низинных болот. Пойменные почвы распространены повсеместно в поймах рек и обладают относительно высоким плодородием. Однако, плодородие большинства почв области весьма низкое, так как они содержат мало гумуса, азота, минеральных веществ. Больше половины окультуренных (пахотных) почв отличаются высокой степенью кислотности, многие подвержены эрозии, переувлажнены» [10].

Растительность типична для средней и южной тайги. Леса занимают около 75% территории области: на северо-западе и юго-востоке 80%, в центральной части до 50%. Самое большое распространение на территории области имеют хвойный и смешанный леса.

1.3 Геологическое строение

В целом строению Вологодской области характерно плановое или прямое соотношение структур осадочного чехла и фундамента. Так, например, отложения, имеющие выходы на дневную поверхность земной коры в пределах Вологодской области или располагающиеся непосредственно под четвертичными отложениями подчиняются следующей структуре:

Наибольшую территорию Вологодской области охватывают отложения пермской (P) системы. Они залегают под четвертичными породами в центральной и северо-восточной частях области, обнажаясь на берегах Сухоны, Вожеги, Уфтюги и других рек. Пермская система представлена морскими, лагунными и наземно-пресноводными породами, общей мощностью от 800 до 850 метров. Нижний отдел (P_1) подразделяется на ассельский (P_{1as}), сакмарский (P_{1s}), сложенные, преимущественно, карбонатными породами с прослоями ангидрита и гипса, реже – галита. Шире развиты среднепермские (биармейская) и верхнепермские отложения, представленные уфимским (P_{2uf}), казанским (P_{2kz}) и татарским (P_{2t}) ярусами. В первых двух преобладают известняки, доломиты и мергели, среди которых имеются прослои глин, алевролитов и песчаников. Характерной особенностью верхнепермских пород, мощность которых достигает 522 метров, служит пёстрая окраска, связанная с разнообразием условий образования.

Четвертичная (Q) система. Отложения четвертичной системы представлены тремя отделами: средним (Q_{II}), верхним (Q_{III}) и современным (Q_{IV}). Они покрывают территорию практически сплошным плащом и отсутствуют только на отдельных участках вдоль обрывистых склонов речных долин. Мощность осадков изменяется в достаточно широких пределах: мощность среднего – наиболее распространённого – отдела колеблется в пределах от 5 до 25 метров, а на участках холмистого рельефа она возрастает до 60 – 80 метров и более. В местах, где имеются погребённые доледниковые долины или ложбины, превышает 150 метров[9].

1.4 Гидрогеологические условия

«Гидрогеологические условия территории отличаются значительной сложностью. Это объясняется пёстрым литологическим составом слагающих пород и различными условиями их залегания в разных частях области» [7].

«Водоносными являются пески, песчаники, трещиноватые мергели, доломиты и известняки палеозоя и мезозоя, а также песчаные разности четвертичных отложений. В связи с наклонным залеганием пород дочетвертичного возраста и переслаиванием водоносных горизонтов с водонепроницаемыми слоями (водупорами) палеозойские породы содержат главным образом напорные – артезианские – воды. Четвертичные (Q) отложения содержат в основном ненапорные воды. Однако в пределах Молого-Шекснинской и Кубено-Верхнесухонской низин и ряде других мест они также содержат артезианские воды, которые приурочены к межледниковым или межстадиальным горизонтам» [7].

«Грунтовые воды, приуроченные к поверхностным отложениям, подвержены значительному загрязнению, особенно в пределах населённых пунктов. Водоносные горизонты, к которым приурочены эти воды, имеют очень непостоянный режим, что связано с их атмосферным питанием, и поэтому колодцы многих населённых пунктов часто пересыхают в периоды летней и зимней межени. Подземные воды, в том числе артезианские воды четвертичных (Q) отложений, отличаются постоянством температуры, солевого состава и полным отсутствием признаков бактериологического загрязнения. Они не требуют предварительной очистки и могут быть использованы для питания местных водопроводов» [7].

1.5 Климатические условия территории Вологодской области

Климат региона умеренно континентальный. Лето короткое, зима продолжительная, но достаточно мягкая. Суровость климата возрастает с запада на восток. Средние температуры самого холодного месяца января с запада на восток изменяются в диапазоне от -11°C до -14°C , а самого тёплого – июля, соответственно, от 16°C до $17,3^{\circ}\text{C}$. В год на территорию Вологодской области выпадает 500 – 650 мм осадков. Максимум осадков выпадает в летний период. При этом испаряемость достаточно низкая, поэтому в области много болот. Снежный покров лежит 165 – 170 дней. Водоёмы обычно замерзают в ноябре и вскрываются ото льда в конце марта, однако в действительности эти показатели могут отличаться даже на месяц, особенно в последние годы, когда во всём Северо-Западном регионе наблюдаются определённые климатические аномалии (тёплые зимы и т.д.).

В условиях календарного года изменчивость погодных условий можно охарактеризовать посезонно.

«Весна. Наступление весны происходит неодновременно по всей территории области. Это можно наблюдать по срокам перехода средней суточной температуры через 0°C : на юго-западе – в среднем 4 апреля, тогда как в северных и северо-восточных районах – только 8 апреля. Поэтому можно считать, что наступление весны происходит в направлении с юго-запада на северо-восток. Преобладание южного и юго-западного воздушных потоков в апреле наблюдается как в западных, так и в восточных районах. В пользу большой роли воздушной циркуляции в наступлении и развитии весны говорит тот факт, что тёплая погода в апреле месяце устанавливается далеко не каждый год, хотя процесс увеличения солнечной радиации происходит ежегодно с точной повторяемостью» [8].

«Лето. Началом летнего сезона можно принять 1 июня. Окончанием же его считают дату первого мороза. Эти явления наблюдаются в разных пунктах области между 11 и 19 сентября, поэтому в среднем продолжительность лета

как безморозного периода равна 105 дням, при этом для западных районов она на 6 или 10 дней длиннее, чем для восточных. В июне всё более возрастающая солнечная радиация постепенно повышает температуру воздуха. Преобладающий поток холодного воздуха с северо-запада не вызывает значительных похолоданий, так как нагретая поверхность земли усиленно прогревает воздушные массы, идущие с более холодного моря. Только при прорывах арктического воздуха, которые в июне уже не отличаются мощностью и продолжительностью, случаются кратковременные похолодания, иногда с небольшими заморозками на почве. Заморозки в июне скорее исключение, чем правило, но последствия от них значительнее, чем в мае. Поэтому предсказание заморозков в этот период и своевременное принятие мер защиты имеют важное значение для региона. Средняя температура июня по области составляет приблизительно 14,5°C, июля – от 16,6°C до 17,5°C. В июне – июле около половины всех дней пасмурно. Пасмурная погода с дождями и ветром наступает при смене воздушных масс, при прохождении фронтального раздела между ними. Образование облаков и выпадение осадков во время вхождений морских масс воздуха при последующем его преобразовании в континентальный происходят при условии достаточно большой относительной влажности. При малой относительной влажности воздуха, как правило, устанавливается ясная погода, днём – тёплая, ночью – прохладная с росами» [8].

«Осень. Если считать наступлением осени начало общего листопада (середина сентября), а её концом – образование устойчивого снежного покрова, что в Вологодской области происходит обычно в период с 12 по 18 ноября, то продолжительность этого сезона составляет 60 – 70 дней. Осень в области – это время частых, нередко обложных дождей. Уже в августе несколько увеличивается число циклонов, которые несут с собой с запада влажный морской воздух. В сентябре – октябре преобладают ветры западных направлений, потому что усиливается циклоническая деятельность. Средняя температура от 2,0°C до 2,5°C. Стоит отметить, что средние температуры

сентября и октября на западе выше, чем на востоке» [8].

«Сравнительно невысокие температуры воздуха и часто выпадающие дожди приводят нередко к избыточному увлажнению почвы в особенности в пониженных местах. Однако не всегда осенью пасмурно и дождливо. При проникновении с юга континентальных масс воздуха устанавливается сухая, ясная и сравнительно тёплая погода. Чаще всего такой период происходит в сентябре и продолжается от нескольких дней до двух недель и более» [8].

«Зима. Фактически она наступает раньше декабря, как только образуется устойчивый снежный покров: в западных районах 17 или 18 ноября, в восточных с 12 по 15 ноября. Сроки из года в год могут изменяться, но в среднем продолжительность зимы в области составляет около четырёх с половиной месяцев. Зимой преобладает континентальный полярный воздух с довольно частыми вхождениями арктических масс. И те, и другие при малом количестве поступающей солнечной энергии обуславливают холодную погоду. Средняя температура самого холодного месяца – января - в западных районах составляет 11°C – 12°C, а в восточных – от 13°C до 14°C. Количество осадков зимой, несмотря на частые снегопады, не велико и составляет в среднем около 150 мм, причём выпадение их связано главным образом с прохождением циклонов. Больше всего выпадает снега в Никольске (178 мм) и меньше всего в Великом Устюге (126 мм). Наибольшей высоты снежный покров достигает во второй декаде марта» [8].

2 Общая характеристика гидрографической сети и водного режима реки Сухоны

Гидрографическая сеть Вологодской области претерпела во времени сильные изменения; она то развивалась, то отмирала во время вторжения мощного ледникового покрова, то затем вновь развивалась (Рисунок 2.1).

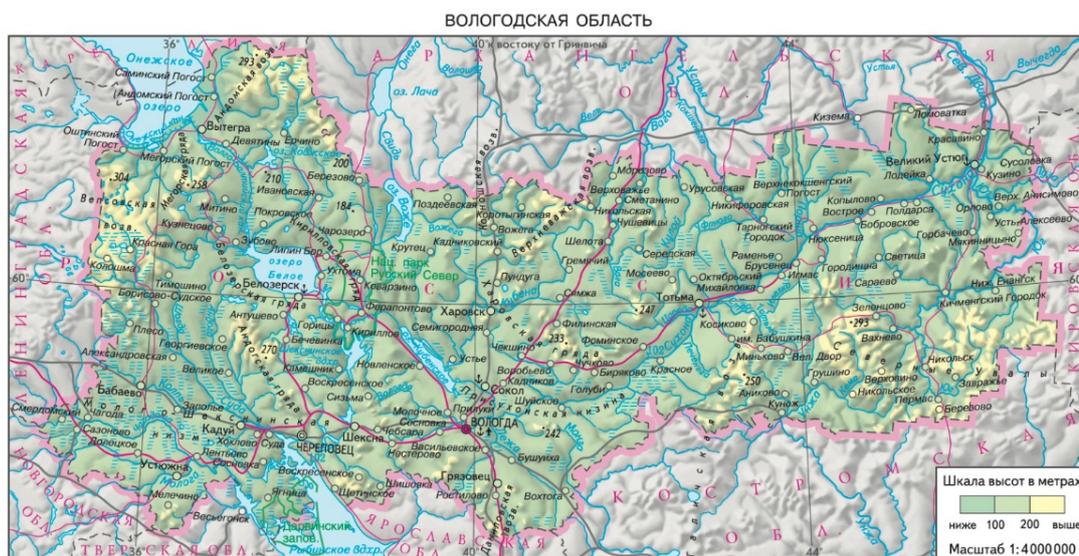


Рисунок 2.1 – Физическая карта Вологодской области.

Водосбор реки Сухоны относится к бассейну Белого моря, Двинско-Печорский бассейновый округ.



Рисунок 2.2 – Схема бассейна р. Сухоны.

2.1 Гидрологическая характеристика реки Сухоны

«Это самая длинная (558 км) и наиболее многоводная река Вологодской области. Название реки по одной из версий происходит от санскритского «сухана», что в переводе на русский язык означает «легкоодолимая». Название с таким значением могли дать реке, на которой были многочисленные броды. Сливаясь с р. Юг, Сухона образует Малую Северную Двину» [11].

Явление это довольно редкое, так как обычно из озера бывает лишь один исток. Северный рукав называется Сухоней, другой - южный, очень мелкий, заросший водной растительностью - Большим Пучкасом. Южный рукав образует петлю длиной 21 км и соединяется с основным руслом на 8-м километре от его истока» [11].

«Для поддержания высокого уровня с целью улучшения судоходных условий реки (путем попусков воды) в 1834 году у деревни Шера, в восьми километрах от истока Сухоны, была построена плотина. Она удерживала воду на высоте около трех метров, что увеличивало глубины на перекатах Средней Сухоны более чем на 30 сантиметров, а Нижней - на 20 см. По тем временам это было большое достижение, и плотина получила название «Знаменитая». В XX столетии Северо-Двинскую шлюзовую систему завершил гидроузел «Знаменитый», построенный в 1928 году. Это пока единственные действующие на реке гидротехнические сооружения» [11].

Отметки уреза воды в Сухоне изменяются от 108 м (урез Кубенского озера) до 51 м (место впадения р. Юг). Средний уклон реки - 0,000105 или 10 см на километр длины. Коэффициент извилистости реки - 1,3. К системе р. Сухоны относятся 493 реки длиной 10 км и более и 374 реки длиной менее 10 км.

«Водосборный бассейн Сухоны вытянут в широтном направлении - с запада на восток. На левобережную часть бассейна приходится 60% его площади, на правобережную - 40%. Площадь водосбора - 50300 кв. км, что примерно равно трети площади Вологодской области. Он представляет собой

волнистую равнину: в верховьях рельеф плоский, волнистый и пологохолмистый, в среднем течении - плоский и волнистый, а в нижнем течении - плоский и холмистый, сильно расчлененный эрозией. Ширина водосборного бассейна в верхней части составляет 180-200 км, рельеф обусловлен ледниковой аккумуляцией, абразионно-аккумулятивной деятельностью послеледниковых водоемов и последующей эрозией. Отс. Нюксеница бассейн сужается до 50-150 км. Это связано с активной тектонической деятельностью, в результате чего произошло усиленное врезание Сухоны в поверхность четвертичных и дочетвертичных пород» [11].

«Абсолютные высоты водосборного бассейна варьируют в пределах 150-175 м. На отдельных участках они достигают 250 м. Водораздел между реками бассейна Сухоны и бассейна Северной Двины находится на Сухонском Заволочье, а между бассейнами Сухоны и Волги - на возвышенностях Северные Увалы, Галичской, Авниге и Вологодской. Поверхность водосбора сильно залесена» [11].

«По гидрографическим особенностям Сухону делят на три части: 1) Верхняя Сухона - от истока до с. Наремы, протяженностью 115 км; 2) Средняя Сухона - от с. Наремы до г. Тотьмы, длиной 170 км; 3) Нижняя Сухона - от г. Тотьмы до устья, длиной 273 км» [11].

«Верхняя Сухона вначале течет на юго-восток, затем поворачивает на юг и несет воду в этом направлении до устья рек Вологды и Лежи. Далее направление течения меняется на северо-восточное. На всем участке Сухона протекает по плоской широкой низменности, называемой Присухонской низиной и бывшей в прошлом дном приледникового озера. Озерная котловина заполнена озерно-ледниковыми отложениями (суглинками, глинами и песками). Ширина речной долины изменяется от 3 км в верховьях до 13-14 км в районе впадения Вологды и Лежи» [11].

«В пределах Присухонской низины река течет в русле с низкими берегами, вдоль реки поднимаются до метра высотой и неширокие (30-60 м) прирусловые валы. Они называются «бережинами». Бережина постепенно

переходит в центральную, пониженную и заболоченную пойму, а далее - в притеррасную пойму. Пойму Сухоны называют «озерина». Для реки на этом участке характерна извилистость: коэффициент извилистости составляет 1,6. Весной при разливе Сухоны на пойме образуется много озер, которые связаны между собой и Сухоной небольшими протоками, или пучкасами. Самыми крупными являются зарастающие озера Кековское, Ивановское, Владычное, Марша и др. В густой растительности скрывается множество гнездящихся птиц. Характерна сильная заболоченность и заторфованность долины. Это обусловлено слабой дренированностью территории при обильном подтоке грунтовых вод и застаивании паводковых и дождевых вод. В половодье уровень воды поднимается на 6-8 м и заливают всю травяноболотную и кустарниковую низменность на десятки километров» [11].

«Ширина русла реки достигает 400 м, а уклон реки составляет всего лишь 0,000014. Малые уклоны в сочетании с более ранним вскрытием рек Вологды и Лежи обуславливают образование обратного течения Сухоны в Кубенское озеро продолжительностью от 3 до 20 дней весной. В летне-осенний период обратное течение наблюдается лишь в отдельные годы после выпадения интенсивных дождей» [11].

«В районе впадения Вологды и Лежи находится самая большая на реке излучина. Ее длина составляет около 18 км, и называется она Окольной Сухоней или Околицей. Для облегчения плавания гребных и парусных судов излучина была спрямлена по приказу князя Глеба Белозерского 250-метровым перекопом в том месте, где в нее теперь впадает река Вологда. Это произошло после 1342 года. Последние 7-8 км современной Вологды и Лежи принадлежали раньше Сухоне» [11].

Берега и русло Верхней Сухоны сложены в основном глинами и суглинками, но в конце участка встречаются каменистые гряды, образующие перекапы, называемые «переборами».

Средняя Сухона протекает в более узкой озерно-ледниковой низине шириной до 3 км (рис. 5.12). Ширина поймы до 500 м, а в местах крутых

излучин увеличивается до 800 м. В русле появляются пороги из валунов и гальки и песчаные перекаты, что препятствует судоходству.

«Русло реки в пределах Средней Сухоны слабоизвилистое, коэффициент извилистости -1,2. Сухона принимает на этом участке 130 притоков. В русле нередко встречаются острова высотой 2-5 м и более. Предположительно это остатки моренных холмов, но есть и намывные острова. В 7 км от Тотьмы выше по течению находятся три острова. Самый большой - Дедов поднимается на 10 м и не затопляется даже в самое высокое половодье. Длина острова 1,5 км, ширина достигает 500 м. Острова Бабий и Внуков значительно уступают Дедову острову по размерам» [11].

«Нижняя Сухона протекает в узкой долине, проложенной между Сухонским Заволочьем и отрогами Северных Увалов. Долина глубоко врезана, местами имеет каньонообразный характер. Берега красивые, обрывистые. Глубина вреза долины в районе Опок составляет 55-60 м. Взору открывается величественная картина многочисленных береговых обнажений верхнепермских пород. Этот участок некогда являлся водоразделом двух рек, одна из которых текла на запад, а другая - на восток. Ширина долины Сухоны в районе прорыва водораздела 200-300 м, а притоки, как правило, отличаются глубокими, часто У-образными долинами. Ниже по течению долина расширяется до 1-2 км. От д. Верхняя Кичуга до устья ширина долины увеличивается до 4 км, глубина вреза уменьшается до 15-25 м. Здесь река течет по Сухоно-Югской низине» [11].

«Террасы р. Сухоны образовались после окончательного спада уровня Сухонско-приледникового озера. Две нижние террасы - озерно-аллювиальные, сложены песчаным и песчано-глинистым материалом, верхние - абразионно-аккумулятивные. Долина асимметрична, террасы, как правило, лучше развиты на одном из берегов. Другой берег - крутой, нередко с выходами коренных пород. Склоны долины Нижней Сухоны расчленены многочисленными оврагами и мелкими речками, лишь крупных притоков на этом участке насчитывается 28» [11].

«В русле реки обычны пороги и перекаты. В районе порогов дно реки кое-где выложено сплошной известняковой плитой. В местах разорванных известняковых гряд находятся быстрины (по-местному «опочки»). Самый порожистый участок расположен у с. Опоки, где уклон достигает 0,0005. Для перекатов и порогов характерны малые глубины. Скорость течения Нижней Сухоны по сравнению с верхней частью увеличивается. На пороге Опоки она достигает в половодье 4-5 м/с. Такая скорость свойственна горным рекам. В 15 км выше по течению от Опок небольшой ручей на берегу образует водопад Васькин ключ» [11].

2.2 Водный режим

«Питание и водный режим реки Сухоны характерен для рек восточноевропейского типа – преимущественно снеговое, с преобладанием весеннего стока. Весеннее половодье является основной фазой водного режима. Наибольшие подъемы уровня наблюдаются при заторах в районе г. В. Устюг. Подъем половодья проходит интенсивно, спад – более плавно. Продолжительный спад в конце июля – августе вызван попусками воды из Кубенского озера. Еще более растянут во времени переход к осеннему подъему и, далее, к зимней межени. С мая по октябрь наблюдаются дождевые паводки, наиболее выраженные в среднем и нижнем течении Сухоны. В отдельные годы пики паводков могут достигать 4-6 метров. Наиболее низкий уровень наблюдается перед весенним подъемом, при снижении грунтового питания. Годовая амплитуда колебания уровней может достигать 10-12 метров» [5].

«Показатели средних годовых расходов воды меняются от 146 м³/с в верхнем течении Сухоны до 361 м³/с - в среднем и до 600 и более м³/с - в нижнем течении. В верхнем течении основная доля стока (70%) проходит весной и летом во время попусков воды из Кубенского озера. В нижнем течении регулирующая роль Кубенского озера почти не сказывается, поэтому наибольший сток приходится на весну (60%)» [11].

«Ледовые явления начинаются по всей реке почти одновременно из-за широтного расположения бассейна. Осенний ледоход происходит обычно в конце октября - начале ноября. На Верхней Сухоне он начинается на 10-15 дней раньше, так как влияют малые скорости течения и вынос более охлажденных вод с северных притоков Кубенского озера. Продолжительность осеннего ледохода в верхнем течении - около 18 дней, а в среднем и нижнем - 2-3 дня» [11].

«Река покрывается льдом через 15-20 дней после ледохода. Вскрытие реки происходит примерно через 15 дней после установления положительных среднесуточных температур воздуха. Раньше вскрывается река в нижнем и

среднем течении» [11].

3 Характеристика методов прогнозирования весеннего стока равнинных рек

3.1 Методика прогнозирования стока рек водобалансовым методом

Расчет по уравнению водного баланса

$$Y = S + X_1 + X_2 - P \quad (3.1.1)$$

где P – суммарные потери талых вод.

Наибольшая трудность – определение суммарных потерь стока.

В северном регионе ЕТР зависят от предвесенней влагонасыщенности водосбора, а в южном – от степени водопроницаемости почв.

По эмпирическим зависимостям. Например:

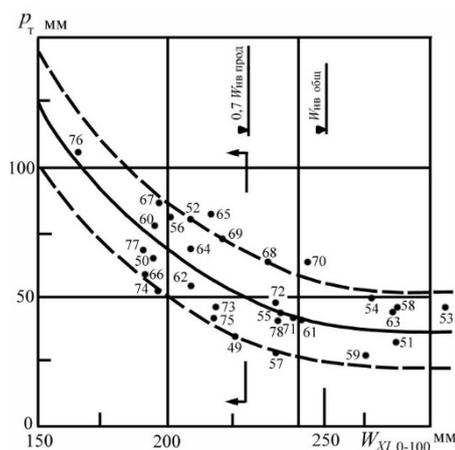


Рисунок 3.1.1 - Зависимость потерь талых вод от общих запасов влаги метрового слоя почвогрунтов, измеренных на полях на конец ноября в бассейне р. Западной Двины для створов Даугавпилс и Екабпилс (по Крестовскому).

У точек – год весны, Штриховой линией оконтурена средняя квадратическая ошибка определения среднего запаса влаги на полевых участках бассейна.

Стрелками ограничена рекомендуемая область применения зависимости от 0,7 продуктивного запаса влаги в почвогрунтах и ниже, т. е. при общих запасах влаги менее 230 мм

В бассейнах рек, расположенных в пределах западной и центральной

части лесостепной зоны, потери зависят исключительно от степени промерзания почв, поскольку их увлажнение к концу зимы близко к наименьшей влагоемкости.

Прогноз стока талых вод Y_T рекомендуется выполнять отдельно для полевых и лесных частей речного бассейна по уравнению вида

$$Y_T = (S + \bar{X}_1) - P = (S + \bar{X}_1) - (\Delta W + \Delta D_{гр} + \Delta D_б + E) \quad (3.1.2)$$

Здесь ΔW – потери талых вод на увлажнение почвогрунтов; $\Delta D_{гр}$ и $\Delta D_б$ – потери талых вод на пополнение запасов грунтовых и болотных вод; E – суммарное испарение за период формирования талого стока.

$$\Delta W = W_{кон} - W_{нач} \quad (3.1.3)$$

Влагозапасы в почве к началу половодья $W_{нач}$, $W_{кон}$ – к моменту окончания склонового стока почвогрунты увлажнены до постоянного значения, равного наименьшей влагоемкости или превышающей ее на 10 %.

Потери на пополнение запасов грунтовых вод рассчитываются по разности между их запасом на конец и начало половодья

$$\Delta D_{гр} = D_{кон} - D_{нач} \quad (3.1.4)$$

Например:

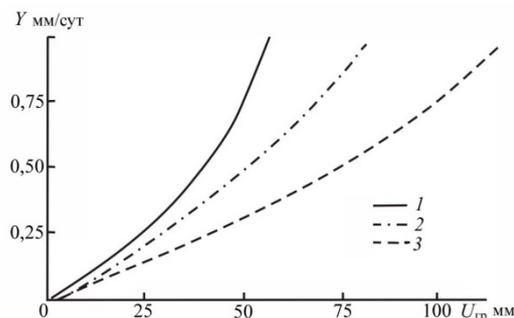


Рисунок 2.2 - Зависимость запасов грунтовых вод $D_{гр}$ от суточного слоя стока рек Y на спаде паводков и в межень для водосборов лесной зоны ЕТР:

1 – водосборы с суглинистыми грунтами на 90 % площади; 2 – водосборы с суглинисто-супесчаными грунтами (пески занимают 35 % площади); 3 – водосборы с песчаными грунтами на 60 % площади

Суммарное испарение за период формирования талого стока рекомендуется определять в зависимости от максимальных снеготаяний к началу весны. Предполагается, что испарение пропорционально количеству тепла, необходимого для превращения снега в воду.

Общий слой стока за половодье Y прогнозируется с учетом устойчивого подземного стока $Y_{\text{п}}$ и нормы дождевого стока на спаде половодья $\bar{Y}_{\text{д}}$ по выражению

$$Y = Y_{\text{т}} + Y_{\text{п}} + \bar{Y}_{\text{д}}. \quad (3.1.5)$$

Не учитывается поверхностное задержание талых вод.

Потери на поверхностное задержание зависят от многих факторов: рельефа, состава почвогрунтов и их увлажнения, уровня грунтовых вод, лесистости, заболоченности, распаханности. В настоящее время отсутствуют способы, позволяющие даже приближенно оценить эти потери за конкретные годы.

Расчленение суммарных потерь на составляющие и определение их отдельно для полевых и залесенных участков создает возможность более глубокого изучения физических процессов формирования весеннего стока.

3.2 Статистические методы

Методы статистических прогнозов предполагают возможность оценки будущего значения процесса по результатам наблюдений прошлых и текущих значений как самого процесса, так и определяющих его факторов[14].

Экстраполяция на будущее информации о связях между стоком и составляющими процесса стокообразования возможны, если за последние 30–40 лет ландшафтные и климатические условия существенно не менялись.

Исследование взаимосвязей природных процессов, оценка одновременного влияния нескольких факторов на данный процесс осуществляются с помощью широко распространенного метода – метода множественной регрессии.

В общем виде задача заключается в установлении взаимосвязи исследуемого процесса Y (предиктант) с факторами, влияющими или определяющими этот процесс X_1, X_2, \dots, X_m (предикторы).

По своей сути статистические прогнозы весеннего стока могут быть отнесены к физико-статистическим. Здесь также основная роль отводится анализу физико-географических условий формирования стока, выявлению основных стокообразующих факторов, выбору оптимальной группы предикторов.

«Практика использования множественной корреляции свидетельствует о том, что получаемые результаты не всегда удовлетворительны. Это связано с несоблюдением ряда требований. Сопоставляемые переменные должны подчиняться нормальному закону распределения, а связи рассматриваемых переменных – линейными. Нередко не выполняется условие отсутствия или незначительной корреляции между рядами переменных (предикторов), а также необходимости значительного превышения объема выборки над числом независимых переменных» [15].

«Несмотря на отмеченные недостатки статистические методы не потеряли своего значения в прогнозах весеннего стока и в настоящее время.

Эти методы наиболее часто применяются при ограниченности данных наблюдений за гидрометеорологическими элементами и невысокой их точности, когда невозможен воднобалансовый расчет. В таких случаях прогнозирование осуществляется на основе регрессионного или дискриминантного анализа» [15].

«Довольно часто основным приемом выпуска прогнозов является использование эмпирических зависимостей, представленных, как правило, в графическом виде. Построение подобных зависимостей необходимо с целью контроля и оценки репрезентативности исходных данных. Тщательный анализ и правильная обработка материалов наблюдений одно из основных условий обеспечения объективности методики прогноза стока» [15].

Корреляционный и регрессионный анализ

Самым важным является коэффициент корреляции Пирсона. Сравниваются (коррелируются) только одинаковые по рангу переменные. При этом связь между переменными может быть прямой и обратной.

1. Свойства коэффициента корреляции ($r_{i,j}$)

- 1) коэффициент корреляции симметричен: $r_{i,j} = r_{j,i}$
- 2) для направленных связей коэффициент корреляции: $-1 \leq r_{i,j} \leq 1$
 для $0 \leq r_{i,j} \leq 1$ ненаправленных:
- 3) если связь прямая: $r_{i,j} > 0$
 обратная: $r_{i,j} < 0$
- 4) полная связь: $r_{i,j} = \pm 1$

Формула для определения коэффициента корреляции:

$$r_{i,j} = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)}{\sigma_{x_i} \sigma_{x_j}}$$

где x_i и x_j – переменные i -ого и j -ого рядов;

\bar{x}_i и \bar{x}_j – средние значения i -ого и j -ого рядов;

σ_{x_i} и σ_{x_j} – СКО i -ого и j -ого рядов.

Таблица 3.2.1 - Матрица корреляции

Переменная	x_1	x_2	x_3	...	x_n
x_1	1	r_{21}	r_{31}	...	r_{n1}
x_2	r_{12}	1	r_{32}	...	r_{n2}
x_3	r_{13}	r_{23}	1		r_{n3}
...
x_n	r_{1n}	r_{2n}	r_{3n}	...	1

Матрица корреляции – парная корреляция, но для совокупности данных. Матрица симметричная относительно диагонали.

Множественная регрессия

Модель множественной линейной регрессии

Нестандартизированное уравнение:

$$y = \sum_{i=1}^k b_i x_i + b_0$$

Стандартизированное уравнение:

$$z_y = \sum_{i=1}^k \beta_i z_i$$

где z_y – стандартизированная переменная y ;

$z_i (i = \overline{1, k})$ – стандартизированная переменная x ;

$\beta_i (i = \overline{1, k})$ – стандартизированный коэффициент регрессии, используемый для оценки силы влияния независимой переменной на зависимую.

Например, если $|\beta_1| > |\beta_2|$, то x_1 оказывает на y большее влияние, чем x_2 . Нестандартизированный коэффициент (b_i) таким свойством не обладает.

Стандартизация данных производится по уравнению:

$$z_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma_x}$$

где \bar{x} – отдельная величина, рассматриваемой переменной;

σ_x – СКО рассматриваемой переменной.

При этом: $\sigma_z = 1$ и $\bar{z} = 0$.

Для определения β применяется метод наименьших квадратов: первые производные по всем параметрам модели регрессии равны нулю и получается система из k уравнений:

$$\begin{aligned} \beta_1 + r_{1,2}\beta_2 + r_{1,3}\beta_3 + \dots + r_{1,k}\beta_k &= r_{1,y} \\ r_{2,1}\beta_1 + \beta_2 + r_{2,3}\beta_3 + \dots + r_{2,k}\beta_k &= r_{2,y} \\ r_{3,1}\beta_1 + r_{3,2}\beta_2 + \beta_3 + \dots + r_{3,k}\beta_k &= r_{3,y} \\ &\dots \\ r_{k,1}\beta_1 + r_{k,2}\beta_2 + r_{k,3}\beta_3 + \dots + \beta_k &= r_{k,y} \end{aligned}$$

Систему решают относительно β_1, \dots, β_k .

$r_{j,i}$ и $r_{i,j}$ ($j, i = \overline{1, k}$) – коэффициенты парной корреляции Пирсона.

b_i – нестандартизированные коэффициенты ($i = \overline{1, k}$):

$$b_i = \frac{\beta_i \sigma_y}{\sigma_i}$$

Свободный член уравнения регрессии:

$$b_0 = \bar{y} - \sum_{i=1}^k b_i \bar{x}_i$$

$b_0 = y$ при $x_i = 0$ (если x_i может принимать такие значения).

σ_i – СКО x_i .

Нестандартизированный коэффициент (b_i) показывает на какую величину в среднем изменится значение зависимой переменной y при увеличении значения соответствующей независимой переменной x_i на 1. Наличие прямой и обратной связи показывает знак нестандартизированного коэффициента:

- 1) если $b_i > 0$, то зависимая переменная y увеличивается на величину $|b_i|$;
- 2) если $b_i < 0$, то зависимая переменная y уменьшается на величину $|b_i|$.

Статистическая значимость коэффициента регрессии заключается в том,

что его значение для генеральной совокупности отличается от 0 с заданной доверительной вероятностью $1 - \alpha$, значения которой могут быть: 0,99; 0,95; 0,9 ($\alpha = 0,01; 0,05; 0,1$ соответственно уровень значимости).

Проверка статистической значимости коэффициента регрессии:

- 1) построение доверительного интервала для коэффициента b_i с использованием значения его стандартной ошибки;
- 2) использование коэффициента Стьюдента и его значимости.

2. Прогнозирование по уравнению регрессии

Зная независимую переменную ($x_i [i = \overline{1, k}]$) определяется:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^k b_i x_i + b_0$$

Для оценки качества модели вычисляется среднеквадратическая погрешность (S).

$$S_y^2 = S_{об}^2 + S_{ост}^2$$

где S_y – полная дисперсия зависимой переменной;

$S_{об}$ – дисперсия, объяснённая влиянием набора независимых переменных (x_1, x_2, \dots, x_k);

$S_{ост}$ – остаточная дисперсия, порождённая неучтёнными факторами.

Показателем качества является отношение: $S_{об}^2/S_y^2$.

$$S_{об}^2/S_y^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = R^2$$

Можно оценивать R^2 , включая поочерёдно независимые переменные. Можно оценивать вклад каждого предиктора в объяснение дисперсии зависимой переменной y . Но при этом необходимо помнить о мультиколлинеарности (может повлиять порядок включения переменных).

3.3 Способы нелинейной тенденции

Способы используются для прогноза, как правило, кривых спада для больших паводков или половодья с заблаговременностью 4–5 суток. Основаны на зависимости $\frac{dQ}{dt} = f(Q)$, где $\frac{dQ}{dt} \neq \text{const}$. Используются на крупных и средних реках.

Способы делятся на 2 группы: аналитические и графические.

Аналитические способы

I.

Теоретическая основа способа предполагает для спада линейное изменение расхода воды по времени добегания, которое приводит к формуле для объема воды W за период спада:

$$W = \frac{Q_0}{2} \tau_{\max}, \quad (3.3.1)$$

где Q_0 – максимальный расход воды, соответствует пику паводка или половодья; τ_{\max} – время, за которое истощаются русловые запасы (максимальное время добегания).

Уравнение водного баланса участка реки в дифференциальной форме:

$$dW = qdt - Qdt,$$

где dW – изменение объема воды; qdt – величина притока воды в речную сеть; Qdt – расход воды через замыкающий створ.

Если $qdt \approx 0 \Rightarrow dW = -Qdt \Rightarrow \Delta W = -Q\Delta t$.

Дифференцируя уравнение (10), получаем $dW = \frac{\tau_{\max}}{2} dQ \Rightarrow \frac{\tau_{\max}}{2} dQ = -Qdt$.

Интегрирование последнего выражения приводит к формуле:

$$Q_t = Q_0 \cdot \ell^{-\frac{2t}{\tau_{\max}}}, \quad (3.3.2)$$

где $\frac{2}{\tau_{\max}} = \alpha$ – коэффициент истощения (спада); t – время от начала спада.

Из выражения (10) следует, что $\tau_{\max} = \frac{W \cdot 2}{Q_0} \Rightarrow \alpha = \frac{Q_0}{W}$. Коэффициент спада α прямо пропорционален максимальному расходу и обратно пропорционален запасу воды в русловой сети на дату прохождения максимального расхода.

Чем больше «крутизна» кривой спада, тем большее значение имеет коэффициент спада. Кроме того, этот коэффициент может быть учтен в зависимости от времени и/или от других гидрометеорологических характеристик, например, $\alpha = f(t)$, $\alpha = f(W_0, \dot{X})$.

Для оценки расходов в период спада и продолжительности спада применяют следующие выражения:

$$Q_t = Q_0 \cdot \ell^{-\alpha t} \Rightarrow \lg Q_t = \lg Q_0 - \alpha t \lg \ell \Rightarrow \alpha_t = \frac{\lg Q_0 - \lg Q_t}{t \cdot \lg \ell},$$

где t – время от начала спада.

II.

Для прогноза продолжительности спада паводка можно воспользоваться набором аналитических формул, которые были предложены Р.А. Нежиховским.

1) Для прогноза продолжительности спада на полупустынных и степных водосборах используется формула:

$$q_t = q_{\max} R^t, \quad (3.3.3)$$

где q_{\max} – максимальный расход воды (пик паводка); t – дни от начала

спада; R – тангенс угла наклона линии связи $q_{t+1} = f(q_t)$.

Продолжительность спада связывается с последней перечисленной характеристикой:

$$t_{\text{спада}} = -\frac{1,30}{\lg R}.$$

И учитывается суммарный приток воды за период спада:

$$\Sigma q = \frac{q_{\text{max}}}{1 - R},$$

который можно найти и по зависимости $\Sigma q = f(q_{\text{max}})$.

Последовательность действий при прогнозе следующая:

$$q_{\text{max}} \rightarrow \Sigma q \rightarrow R \rightarrow t_{\text{спада}}.$$

Рекомендуемая заблаговременность для рассмотренного подхода не более 10 суток.

2) Для прогноза продолжительности спада на лесных водосборах предлагается следующее уравнение для кривой спада:

$$q_t = q_{\text{max}} \cdot e^{-kt^2}, \quad (3.3.4)$$

где k – тангенс угла наклона линии связи $2,3 \lg(q_{\text{max}} / q_t) = f(t^2)$.

Продолжительность спада определяется по формуле:

$$t_{\text{спада}} = \frac{1,73}{\sqrt{k}}.$$

Суммарный приток за период спада:

$$\Sigma q = \frac{0,89 q_{\text{max}}}{\sqrt{k}}.$$

Суммарный приток можно связать со снегозапасами, определенными на дату прохождения максимального расхода воды $\Sigma q = f(S)$.

Последовательность действий при прогнозе следующая:

$$S \rightarrow \Sigma q \rightarrow k \rightarrow t_{\text{спада}}.$$

3) Разработана и, так называемая, универсальная формула, которая может описать кривую спада для водосборов, находящихся в различных физико-географических условиях:

$$q_t = q_{\text{max}} \cdot \left[1 - \left(\frac{t}{t_{\text{спада}}} \right)^m \right]^2, \quad (3.3.5)$$

где m – показатель, учитывающий форму кривой спада (см. рис. 3).

Суммарный приток определяется по формуле:

$$\Sigma q = q_{\text{max}} \cdot t_{\text{спада}} \left(1 + \frac{1}{2m+1} - \frac{2}{m+1} \right),$$

где $t_{\text{спада}} = f(q_{\text{max}})$.

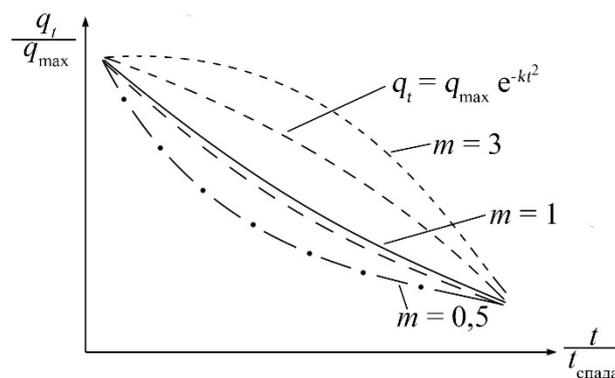


Рис. 3.3.1 - Иллюстрация влияния показателя m на форму кривой спада.

Графический способ

Графический способ основан на осреднении и типизации кривых спада, а также на зависимости $\frac{dQ}{dt} = f(Q)$.

Строятся типовые кривые спада отдельно для каждой реки по ежегодным относительным кривым. Расходы воды этих кривых выражаются в долях (или %) от максимального $\alpha_t = \frac{Q_t}{Q_{\max}} \cdot 100\%$, а время от начала спада – в долях (или %) от общей продолжительности спада $\beta_t = \frac{t}{t_{\text{спада}}} \cdot 100\%$. По этим данным строится семейство относительных кривых спада вида

$$Q_t / Q_{\max} = f(t / t_{\text{спада}}). \quad (3.3.6)$$

В поле этих относительных кривых устанавливается типовая или средняя многолетняя кривая спада.

Использование типовой кривой спада основано на известных данных о максимальном расходе и расходе воды через несколько суток t после начала спада. По значению α_t с типовой кривой спада снимается значение β_t и определяется продолжительность спада. Затем по вычисленным значениям β_t устанавливаются соответствующие величины α_t и вычисляются расходы воды на спаде половодья (паводка). Способ учитывает тенденцию изменения расхода воды в начальный период спада.

Прогностические действия можно записать в следующем виде:

$$Q_t = Q_{\max} \cdot \alpha_t, \quad \beta_t = \frac{t}{t_{\text{спада}}} \Rightarrow t_{\text{спада}} = \frac{t}{\beta_t} = \frac{3}{\beta_3} \quad (\text{значение } t \text{ можно взять любое}).$$

3.4 Методика динамического фонового прогноза изменения водности

Для прогноза используются модели склонового стока:

– *первого порядка*:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{\dot{X}}{\tau}, \quad (3.4.1)$$

где Q – расход (модуль, слой) стока; \dot{X} – интенсивность осадков; k – коэффициент стока; τ – время релаксации речного бассейна.

– *второго порядка*:

$$\tau_2 \frac{d^2Q}{dt^2} + \left(\frac{\tau_2}{k\tau_1} + 1 \right) \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{k\tau_1}Q = \frac{1}{\tau_1} \dot{X}, \quad (3.4.2)$$

где τ_1 – время добегания поверхностного стока; τ_2 – время добегания подземного стока.

При прогнозировании водности в период снеготаяния внешнее воздействие (интенсивность осадков \dot{X}) рассматривается как произведение коэффициента снеготаяния a (который оптимизируется на фактическом материале) на сумму температур воздуха $\sum T^\circ\text{C}$.

Конечно-разностная аппроксимация используемых моделей

Для численной реализации моделей используются аппроксимации:

а) модель склонового стока первого порядка:

$$\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t} = -\frac{1}{k\tau}Q_i + \frac{\dot{X}_i}{\tau}; \quad (3.4.3)$$

б) модель склонового стока второго порядка:

$$\tau_2 \frac{Q_{i+1} - 2Q_i + Q_{i-1}}{(\Delta t)^2} + \left(\frac{\tau_2}{k\tau_1} + 1 \right) \left(\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t} \right) + \frac{1}{k\tau_1}Q_i = \frac{\dot{X}_i}{\tau_1}, \quad (3.4.4)$$

где i – моменты времени.

Технология прогноза склонового стока

Прогноз состоит из трех этапов (а, б, в).

а) Оптимизация параметров модели на фактическом материале за предыдущие 15 суток (рис. 2) по критериям S/σ_{Δ} и относительному числу оправдавшихся поверочных прогнозов ($P\%$).

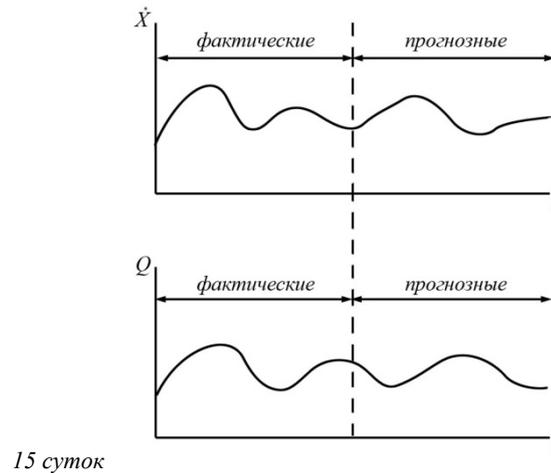


Рис. 3.4.1 - К пояснению оптимизации параметров.

За оптимальные значения параметров (коэффициент стока, время добегания поверхностного стока, коэффициент снеготаяния, время добегания подземного стока) принимаются те значения, с которыми при поверочном прогнозе получены минимальное соотношение S/σ_{Δ} и максимальная величина P .

Методика оптимизации заключается в следующем.

1. Рассчитывается допустимая погрешность:

$$\delta_{\text{доп}} = \pm 0,674\sigma_{\Delta}, \quad (3.4.5)$$

где σ_{Δ} – среднее квадратическое отклонение изменения прогнозируемой величины за период заблаговременности прогноза от среднего значения этого изменения:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}, \quad (3.4.6)$$

где Δ_i – изменение прогнозируемой величины за период заблаговременности прогноза; $\bar{\Delta}$ – среднее значение этих изменений; n – число изменений.

Заблаговременность краткосрочных прогнозов времени наступления гидрологических явлений (водных и ледовых) определяется периодом от даты выпуска прогноза до указанной в прогнозе даты. В нашем случае имеет место процесс прогнозирования на интервале 8 суток с дискретностью $\Delta t = 1$ сутки, однако оптимизация параметров производится по пятнадцати предшествующим фактическим осадкам и стоку.

2. Оценивается оправдываемость отдельного прогноза. Прогноз считается оправдавшимся, если абсолютная величина его погрешности меньше или равна допустимой.

3. Оценивается эффективность методики. Мерой точности методики прогнозирования является средняя квадратическая погрешность проверочных прогнозов, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n - m}}, \quad (3.4.7)$$

где y_i и y'_i – соответственно фактическое и предсказанное значения; n – число членов ряда; m – число степеней свободы, равное числу постоянных коэффициентов в прогностическом уравнении.

За критерий применимости и качества методики принимается отношение S/σ_{Δ} .

Погрешности определения S и σ зависят и от числа членов ряда n , поэтому учитываются следующие условия применимости методик прогнозирования: при $n \leq 15$ $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,70$; при $15 < n < 25$ $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,75$; при $n \geq 25$ $S/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$.

4. Определяется обеспеченность методики:

$$P = \frac{n'}{n} 100, \quad (3.4.8)$$

где n' – число оправдавшихся прогнозов.

3. Выбираются оптимальные значения параметров, при которых получены минимальное соотношение S/σ_{Δ} и максимальная величина P .

Включение в методику уровней воды (прогноз зон затопления)

Во многих практических случаях важны не прогнозные расходы (пусть даже фоновые, по огромной территории и в динамике на 8 суток вперед), а уровни воды, от которых зависит подтопление дорог, населенных пунктов, мостов и т.п. (хотя и прогноз низких уровней не менее важен, так как ими могут лимитироваться экологические показатели, оголения водозаборов и т. д.).

При использовании для прогноза расхода уравнения (1) мы используем ежедневные расходы воды как для обеспечения математической корректности самого прогноза (задание начального условия), так и для сравнения прогнозных значений с фактическими (а также при оптимизации параметров k и τ). Но ведь реально расходы измеряют не более нескольких десятков за год. Для получения же ежедневных их значений пользуются всевозможными косвенными методами учета стока, в основном зависимостью расхода от уровня $Q = f(H)$. Потому для того, чтобы перейти от расхода к уровню достаточно в моделях (1) и (2) вместо расхода подставить функции $f(H)$:

$$\frac{df(H)}{dt} = -\frac{1}{k\tau} f(H) + \frac{\dot{X}}{\tau}. \quad (3.4.9)$$

Подставляя это выражение в прогностическое уравнение (3.4.10) получим алгоритм прогноза уровней воды (при $dt \approx \Delta t = 1$):

$$f(H_{i+1}) = f(H_i)/(k\tau) + \dot{X}_i/\tau + f(H_i). \quad (3.4.11)$$

Методика его использования ничем не отличается от предыдущей [16][17].

4 Формирование базы данных для исследования

Река Сухона в гидрологическом отношении является изученным водотоком. Собраны и проанализированы данные наблюдений расходных и уровенных гидрологических постов (р. Сухона – д. Рабаньга, р. Сухона – г. Тотьма, р. Сухона – д. Каликино и др.), метеорологических станций бассейна исследуемой реки. Источник данных – архивные материалы Вологодского ЦГМС, ресурсы ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [1][4][5][6].

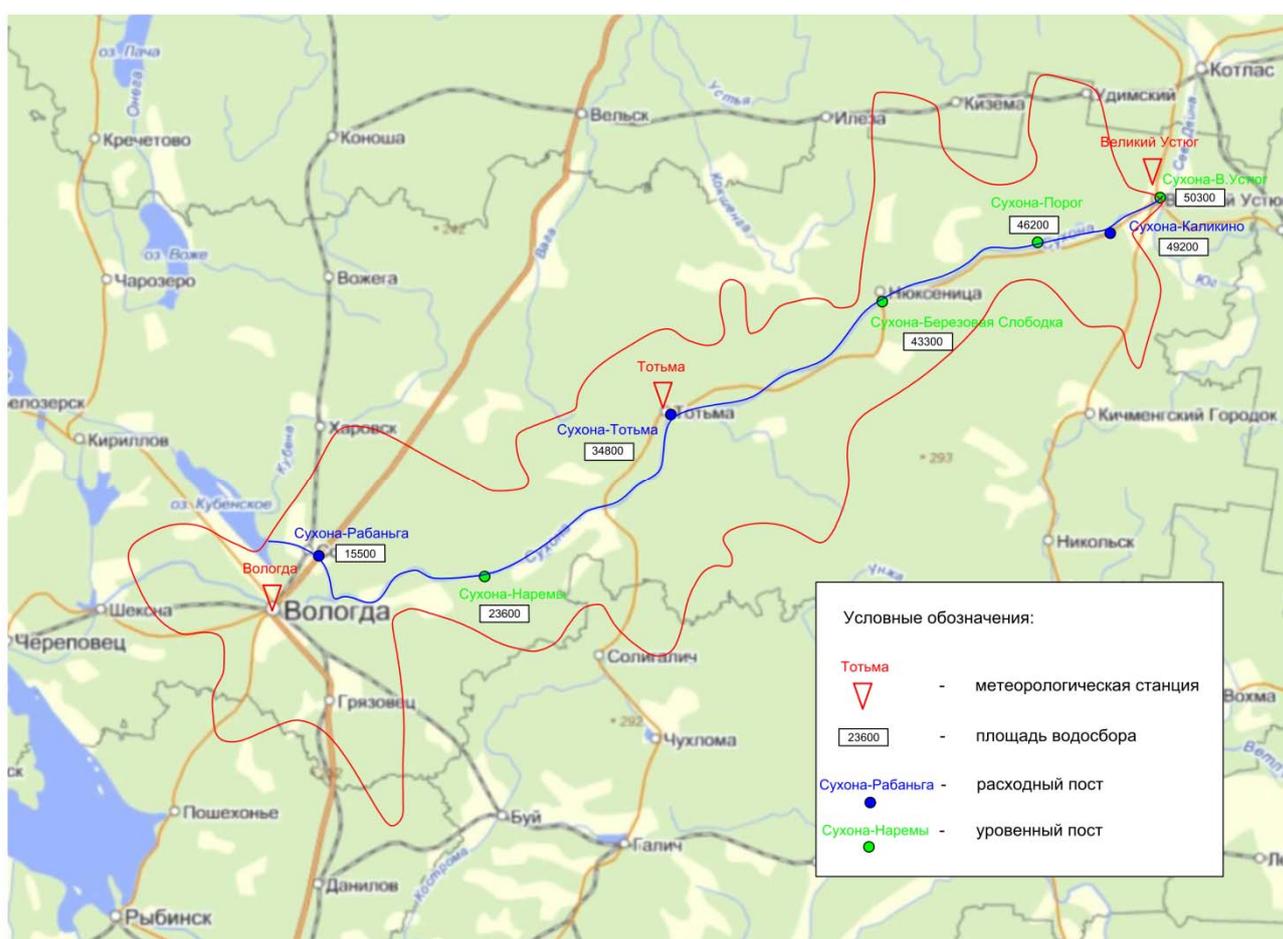


Рисунок 4 – Схема гидрометеорологической изученности.

4.1 Гидрологические данные

Гидрометеорологическая изученность района с перечнем постов приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Гидрологическая изученность района

№ п/п	Название водного объекта и пункта наблюдений	Код поста	Расстояние (км) от		Площадь водосбора, км ²	Период действия, год		Высота нуля графика, м БС
			истока	устья		открыт	закрыт	
1	р.Сухона - д.Рабаньга	70085	33.0	525	15500	1877	действ.	105.74
2	р.Сухона - с.Наремы	70087	111	447	23600	1877	2010	104.71
3	р.Сухона - г.Тотьма	70091	281	277	34800	1876	действ.	98.48
4	р.Сухона - д.Березовая Слободка	70094	389	169	43300	1877	действ.	81.46
5	р.Сухона - д.Порог	70096	486	72.0	46200	1977	действ.	63.25
6	р.Сухона - д.Каликино	70098	519	39.0	49200	1913	действ.	54.29
7	р.Сухона - г.Великий Устюг	70101	555	3.00	50300	1876	действ.	49.34

Выполнен анализ имеющихся архивных материалов Вологодского ЦГМС, выбран период непрерывных наблюдений с 1991 по 1995 гг. (с отсутствием пробелов и выбраковок). Оцифрованы и приведены в стандартный табличный вид сведения о расходах воды трех гидрологических постов, уровнях воды – семи постов. Пример имеющейся информации – таблицы 4.2-4.3. Совмещенные хронологические графики расходов и уровней гидрологических постов – рисунки 4.1-4.6.

Таблица 4.2–Таблица 1.2 Уровень воды (пример)

Таблица 1.2. Уровни воды.....т.1 вып. 8 1991

р. Сухона - г. Тотьма

Отметка нуля поста 98.56 м БС

Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	219 Z	127 I	84 I	97 I	450	291	216	129	99	109	132)Ш	158
2	214 Z	124 I	85 I	99 I	441	293	213	125	98	113	120)Л	172):
3	209 Z	121 I	86 I	102 I	435	305	210	119	96	118	106)Ш	179)
4	206 I	119 I	87 I	104 I	433	321	205	114	94	127	97)Ш	179)Л
5	202 I	117 I	88 I	109 I	411	330	202	108	91	135	86)Ш	160)Л
6	198 I	114 I	89 I	118 I	395	329	195	104	89	139	84)Ш	109)Л
7	194 I	111 I	90 I	134 I	388	320	184	100	87	140	77):	93)Л
8	189 I	109 I	91 I	167 I	382	310	171	99	87	139	74:	124)Л
9	184 I	108 I	91 I	231 I	374	301	156	96	86	136	75:	139)X
10	175 I	106 I	91 I	299 (	365	294	144	95	86	130	78	144)*
11	172 I	103 I	91 I	371 (	358	284	130	92	86	125	86	153)*
12	170 I	100 I	91 I	461 П	351	277	122	91	87	119	99	161)*
13	167 I	99 I	90 I	529ЛН	342	269	116	93	88	113	110	166)*
14	165 I	98 I	89 I	549ЛН	335	264	114	94	90	107	117	170):
15	162 I	97 I	88 I	611 X	327	261	114	96	92	103	123	175)Ш
16	158 I	96 I	87 I	639 X	320	259	114	98	94	100	130	187)Л
17	155 I	95 I	87 I	628	314	258	114	100	96	100	137	190 Z
18	152 I	94 I	86 I	585	307	259	113	101	97	103	137)Ш	185 Z
19	149 I	92 I	85 I	545	301	260	114	101	97	109	140):	179Z
20	146 I	91 I	84 I	522	297	263	112	100	94	126	140)Ш	173 Z
21	144 I	90 I	83 I	516	295	269	109	99	92	159	139)*	167Z
22	143 I	89 I	83 I	564	297	270	107	100	90	4189	135)Л	163 Z
23	142 I	88 I	82 I	594	301	269	104	104	91	207	126)Л	159 Z
24	142 I	87 I	82 I	588	307	264	103	108	91	212	122)Л	156 Z
25	141 I	86 I	82 I	564	313	257	103	111	92	210	115)Л	154 Z
26	140 I	85 I	82 I	537	313	248	103	111	94	202	110)X	151Z
27	139 I	85 I	84 I	512	308	238	106	110	95	191	110)	148 Z
28	138 I	84 I	86 I	487	301	231	111	107	96	180	116)	144 I
29	136 I		88 I	467	292	226	119	105	98	167	126	141 I
30	133 I		91 I	461	288	221	128	103	103	146)	139	139 I
31	130 I		93 I		291		131	101		141		135 I
Средн.	165	101	87	406	343	275	138	104	93	142	113	157
Выш.	220	127	93	642	452	331	217	130	104	212	141	191
Низш.	129	84	82	96	287	220	102	90	86	100	74	85

	Сред- ний уро- вень	Высший				Низший периода открытого русла				Низший зимнего периода			
		уро- вень	дата		число случа- ев	уро- вень	дата		число случа- ев	уровень	дата		число случа- ев
			пер-вая	по- следн			пер-вая	по- следн.			пер-вая	по-следн.	
За год	177	642	16.04		1	76	10.11		1	82	22.03	26.03	5
1878-1991		812	02.05.57		1	42	10.10.75		1	0	02.03	10.03.13	9

Рисунок 4.3–Таблицы 1.3 Расход воды (пример)

Таблица 1.3. Расход воды, куб. м/с												Т.1 вып. 8 1993		
р.Сухона - г. Тотьма														
W= 12.6 куб. км		M= 11.5 л/с кв. км			H=362 мм		F=34800 кв.км							
Число	Месяц													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	54.5	27.2	34.4	68.6	1720	633	351	466	792	422	411	165		
2	52.7	27.2	34.6	72.6	1790	620	329	448	704	410	393	163		
3	52	27.2	34.7	77.6	1810	610	303	430	633	405	375	162		
4	50.1	28	34.7	80.6	1910	593	282	416	583	391	373	162		
5	49.4	28.9	35.8	87	2000	586	249	407	546	379	359	158		
6	47.9	28.9	35.8	90.3	1950	579	238	405	524	368	341	158		
7	47.5	29.8	35.8	99.4	1800	569	231	396	527	363	335	155		
8	46.6	30.7	35.8	111	1670	560	263	393	553	351	303	155		
9	47.2	31.6	36.7	131	1510	546	363	457	589	349	214	153		
10	46.9	31.9	36.5	176	1410	540	388	566	610	340	212	151		
11	45.9	32.3	36.5	247	1330	540	363	610	613	340	210	151		
12	45.9	33.2	36.5	334	1250	550	346	593	603	346	207	149		
13	45.3	33.2	36.4	436	1160	563	324	553	586	374	203	149		
14	44.3	32.9	36.4	546	1080	563	311	514	573	419	203	147		
15	42.9	32.8	37.3	629	1020	553	316	483	553	466	199	147		
16	42	33.7	37.3	693	972	540	335	457	527	508	197	146		
17	41	33.7	37.3	755	932	527	428	445	511	520	194	146		
8	40	33.7	38.4	807	896	511	504	433	495	511	192	144		
19	39	34.6	38.6	882	856	495	556	430	483	495	188	144		
20	38.2	34.3	39.9	955	832	483	583	407	472	486	186	141		
21	36.8	34.6	40.3	1020	796	474	576	405	463	511	186	141		
22	36.1	34.4	42.1	1160	772	469	553	422	451	583	181	141		
23	34.2	34.4	43.2	1180	757	460	527	439	445	623	181	138		
24	33.2	34.4	44.3	1240	746	451	498	442	454	640	177	138		
25	32.2	34.4	46.5	1290	731	442	477	1180	480	593	177	134		
26	31.2	34.4	48.3	1360	712	433	480	573	495	563	174	134		
27	31.2	34.4	51.7	1480	700	430	495	708	498	520	171	131		
28	30.3	34.7	54.7	1580	690	425	498	840	477	495	170	131		
29	30.3		57.8	1670	672	416	486	900	457	466	170	128		
30	30.3		62	1690	661	388	480	900	428	438	168	128		
31	29.2		65.8		644		480	868		411		124		
Декада														
1	49.5	29.1	35.5	99.4	1760	584	300	438	601	378	332	158		
2	42.5	33.4	37.5	62.8	1030	533	407	493	524	447	198	146		
3	32.3	34.5	50.6	1370	716	439	505	634	465	531	176	133		
Средн.	41.1	32.2	41.5	698	1150	518	407	525	536	454	235	146		
Наиб.	55.4	34.7	66.3	1690	2000	637	586	908	820	651	411	165		
Наим.	29.2	27.1	34.4	68.1	640	379	231	393	425	337	168	124		
	Сред- ний расход воды	Наибольший			Наименьший периода открытого русла			наименьший зимнего периода						
		рас- ход	дата		число	рас- ход	дата		число	рас- ход	дата		число	
		пер- вая	после дня	слу- чаев	пер- вая	после дня	слу- чаев	пер- вая	после дня	слу- чаев	пер- вая	после дня	слу- чаев	
За год	399	2000	5.05	1	231	7.07		1	27.1	3.02		1		
1933-1993	2850	02.05.1957		1	55.2	28.10.1939		1	19.1	15.02	19.02.1976	4		

Таблица 4.4– Сток весеннего половодья за 1991-1995 гг.

Год, выводные характеристики за весь период наблюдений	Дата			Продолжительность половодья, сутки	Наибольший срочный расход куб.м/с	Суммарный слой стока за половодье, мм	Объем стока за половодье, млн. куб.м	Сток за половодье, % от годового
	начала половодья	наибольшего срочного расхода	окончания половодья					
д. Рабаньга								
1991	19.04	11.05	08.07	81	579	189	2.94	53
1992	27.03	14.05	22.06	88	520	128	1.98	54
1993	04.04	20.05	30.06	88	538	131	2.04	40
1994	07.04	08.05	29.07	113	527	112	1.73	38
1995	09.04	08,09.05	27.06	72	482	139	2.16	54
Средн.мног.	11.04	14.05	12.07	92	507	155	2.40	54
г. Тотьма								
1991	07.04	17.04	30.05	54	2140	155	5.39	46
1992	28.03	25.04	23.06	88	1730	188	6.54	72
1993	08.04	05.05	04.06	58	2040	147	5.12	39
1994	10.04	02.05	17.05	38	2070	107	3.74	33
1995	10.04	21.04	30.06	82	2610	200	6.95	70
Средн.мног.	09.04	29.04	13.06	72	1850	144	5.02	55
д. Каликино								
1991	08.04	18,23.04	30.05	53	3810	166	8.19	50
1992	01.04	25.04	28.06	89	2840	189	9.29	71
1993	09.04	06.05	29.05	51	4840	150	7.38	41
1994	15.04	01,02.05	17.05	33	4330	133	6.54	36
1995	12.04	21.04	29.06	81	5430	202	9.94	67
Средн.мног.	13.04	02.05	23.06	70	3430	155	7.6	56

Таблица 4.5 – Характерные уровни воды за 1991-1995 гг.

Характеристика	Высший уровень						Высший уровень		Колебание уровня за год
	за год		зимнего периода		весеннего ледохода		периода открытого русла		
	см	дата	см	дата	уровень	дата	см	дата	см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	14
р. Сухона - д. Рабаньга. Отметка нуля поста 105,74 м БС									
1991	530	11.05	277	08.09.12.90	334	09.04	225	24.10	452
1992	531	13-14.05	200	03.12.91	384	17.04	210	23.06	527
1993	547	16-16.05	295	22.04	-	-	388	11.09	542
1994	553	09-10.05	334	27.10.93	399	22.04	226	17.10	516
1995	567	01-04.05	216	22.10.94	-	-	206	28.06	497
Средн. многолетн.	495	11.05	229	15.11	342	19.04	111	-	461
р. Сухона - г. Тотьма. Отметка нуля поста 95,56 м БС									
1991	642	16.04	250	25.12.1990	642	16.04	331	6.06	568
1992	537	25.04	191	17.12.1991	454	15.04	123	24.06	523
1993	614	5.05	119	03.11.1992	503	25.04	340	29.08	590
1994	648	2.05	249	16.11.1993	551	25.04	433	23.05	615
1995	757	21.04	143	9.04	746	20.04	112	30.1	704
Средн. многолетн.	570	30.04	193	24.11	505	24.04	233	-	521
р. Сухона - д. Каликино. Отметка нуля поста 54,29 м БС									
1991	714*	14.04	380	30.11.90	714*	14.04	259	07.06	628*
1992	603*	17.04	259	15.12.91	603	17.04	110	24-25.10	543*
1993	669	06.05	306	31.10.92	518	24.04	289	30.08	537
1994	630	01.05	245	17.11.93	531	22.04	459	22.07	546
1995	714	21.04	208	21.11.94	596	19.04	128	30.06	638
Средн. многолетн.	666	24.04	277	23.11	631	22.04	217	-	587

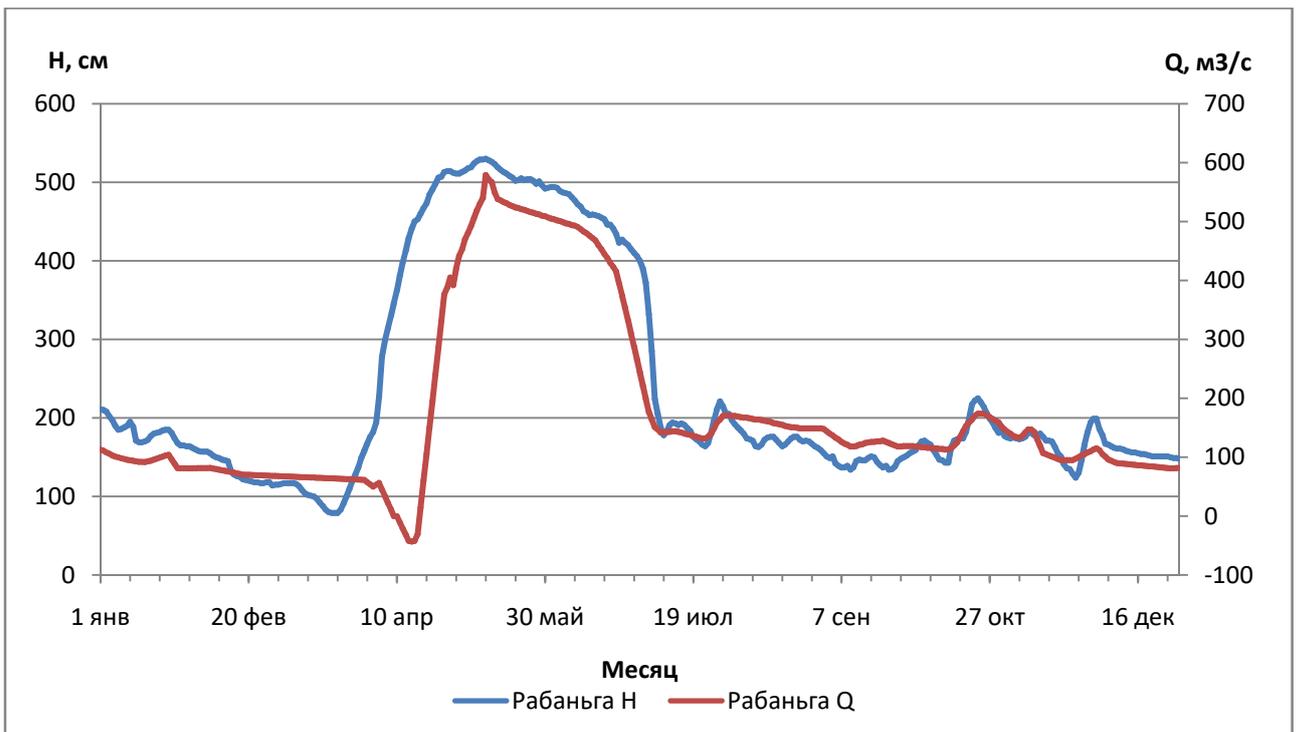


Рисунок 4.1 – Совмещенные хронологические графики г/п р. Сухона - д. Рабаньга за 1991 г.

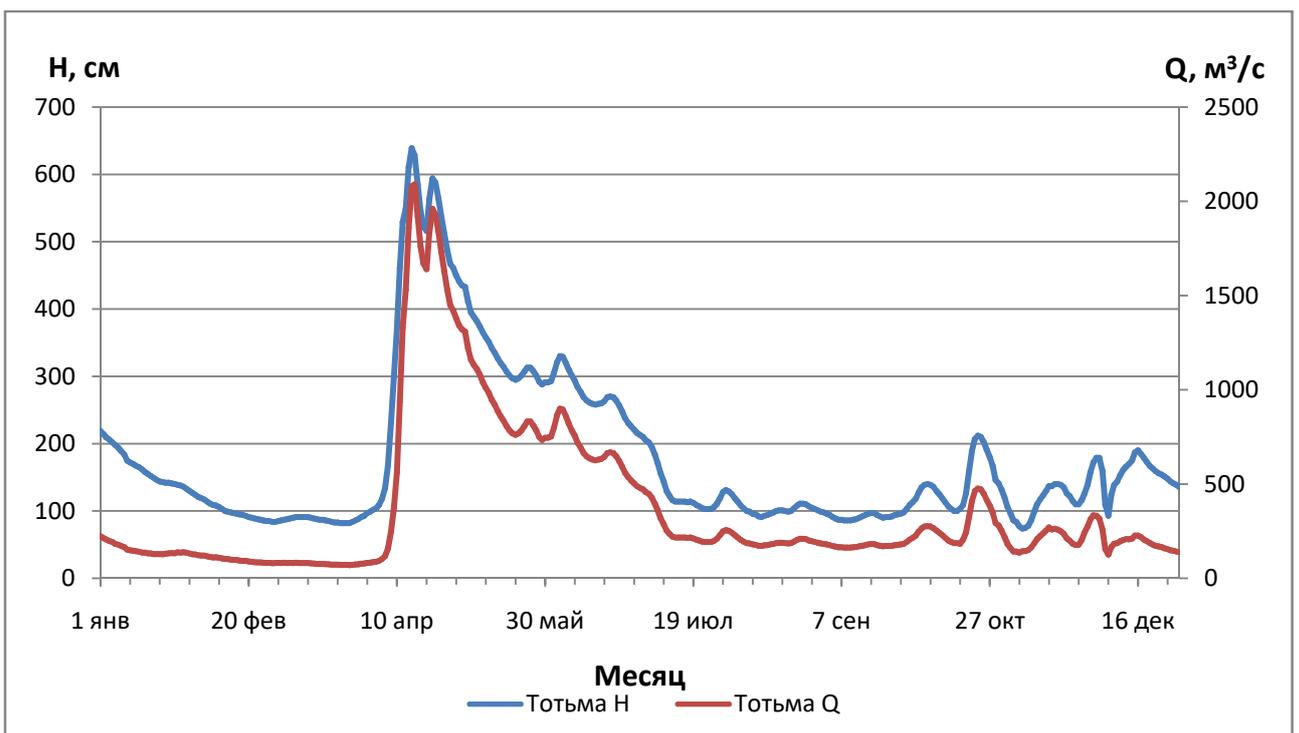


Рисунок 4.2 – Совмещенные хронологические графики г/п р. Сухона – г. Тотьма за 1991 г.

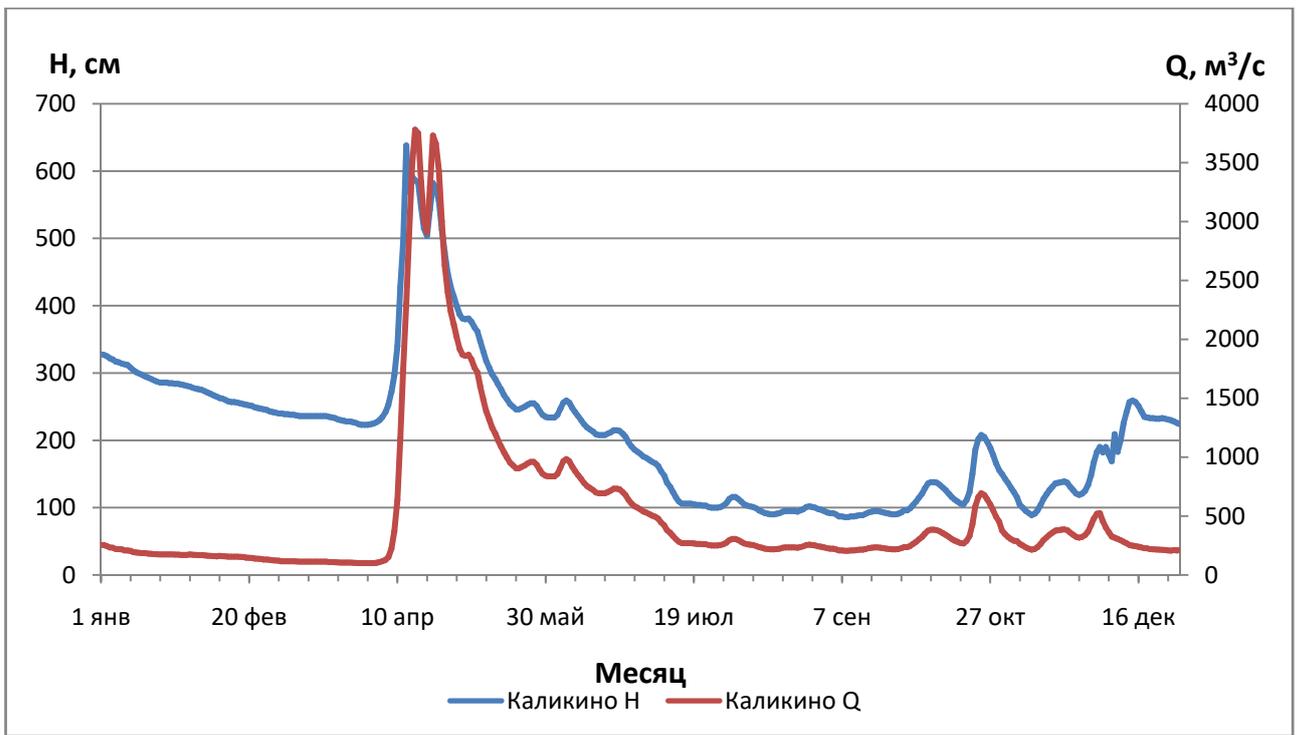


Рисунок 4.3 – Совмещенные хронологические графики г/п р.Сухона- д. Каликино за 1991 г.

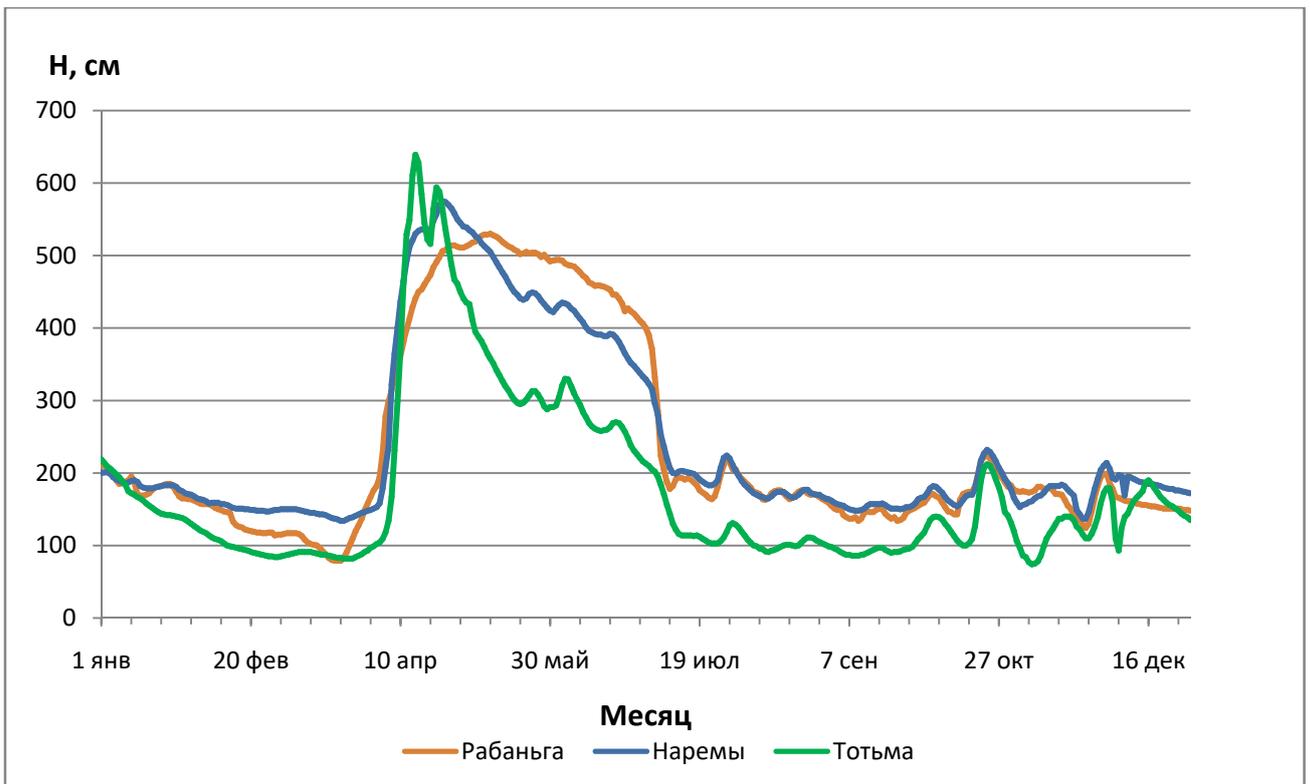


Рисунок 4.4 – Совмещенные хронологические графики хода уровней г/п д. Рабаньга, с. Наремы, г. Тотьма за 1991 г.

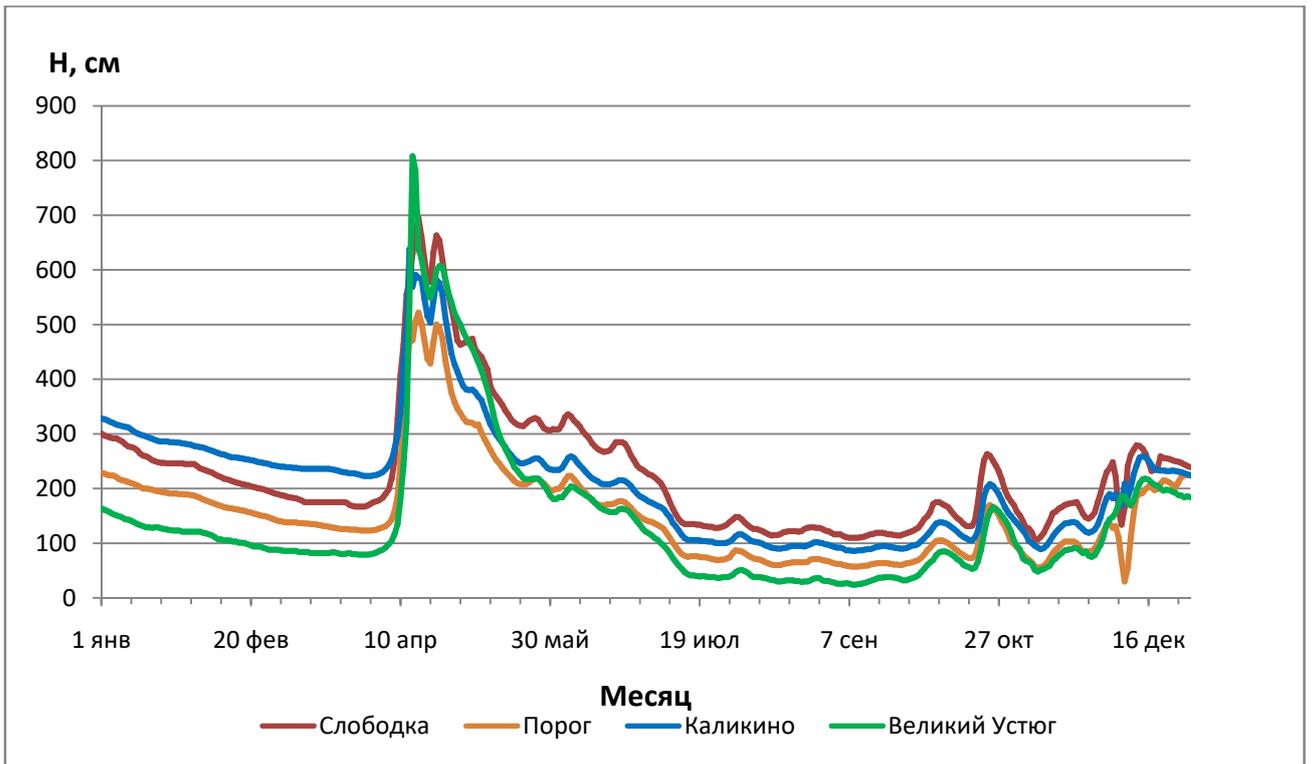


Рисунок 4.5 – Совмещенные хронологические графики хода уровней г/п д. Березовая Слободка, д. Порог, д. Каликино, г. Великий Устюг за 1991 г.

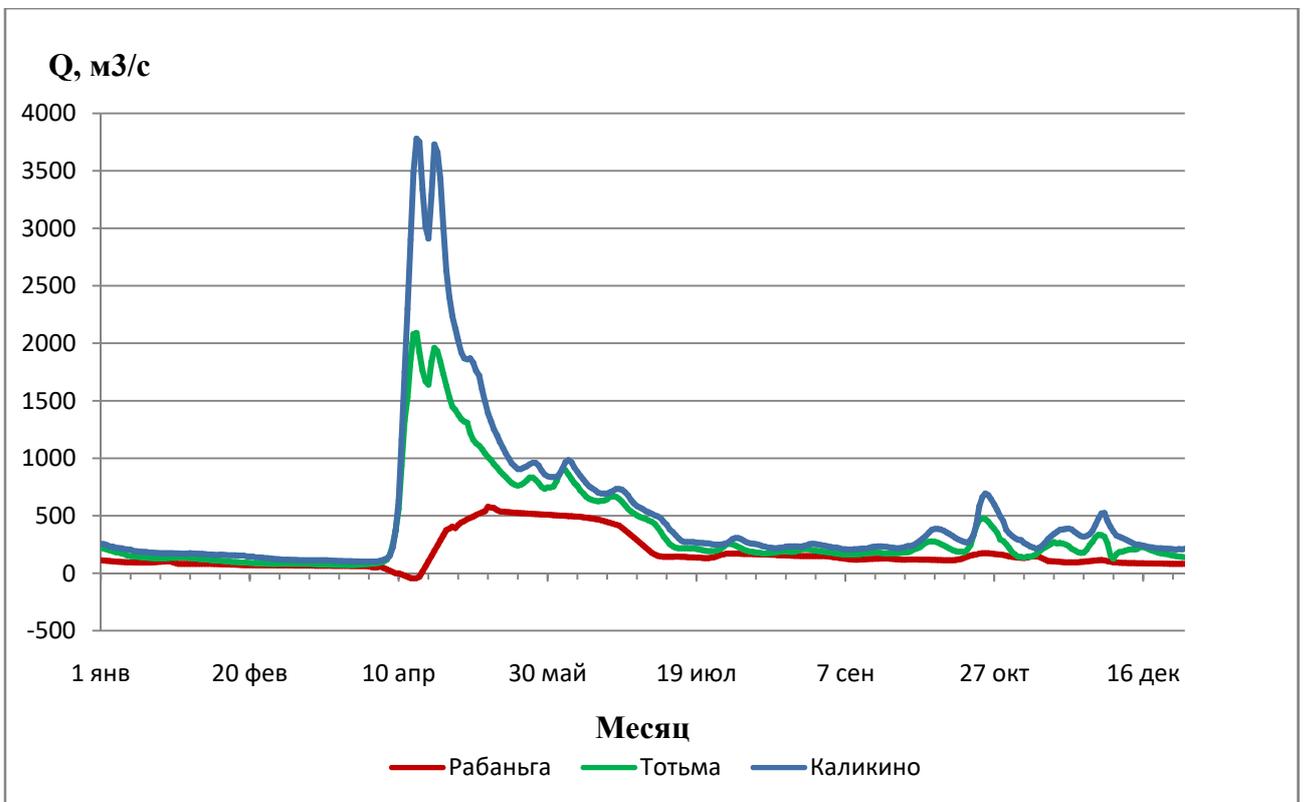


Рисунок 4.6 – Совмещенные хронологические графики расходов воды г/п д. Рабаньга, г. Тотьма, д. Каликино, г. Великий Устюг за 1991 г

4.2 Метеорологическая информация

Создана база метеорологических характеристик по данным наблюдений трех метеостанций бассейна р. Сухоны –Вологда, Тотьма, Великий Устюг. Источником информации послужили специализированные массивы ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центра данных»[6]. Данные приведены в стандартный табличный вид, удобный для дальнейшего использования. Основные сведения о метеорологических станциях приведены в таблице 4.2.1. Примеры основных массивов данных с перечнем наблюдаемых метеорологических характеристик – таблицы 4.2.2 – 4.2.3.

Таблица 4.2.1 - Метеорологическая изученность района

Метеостанция	Синоптический номер	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота метеоплощадки над уровнем моря, м	Период наблюдений
Вологда	27037	59° 19 '	39° 56 '	125	1875 - действ.
Тотьма	27051	59° 53 '	42° 45 '	134	1961 - действ.
Великий Устюг	22981	59° 19 '	39° 56 '	94	1957 - действ.

Таблица 4.2.2– Высота снежного покрова

Индекс ВМО	Год	Месяц	День	Высота снежно го покрова	Степень покрова окрестнос ти	Дополнитель ная информация о	Признак качества по высоте	Дополнитель ная информация с
27051	1991	1	1	37	10	0	0	0
27051	1991	1	2	38	10	0	0	0
27051	1991	1	3	36	10	0	0	0
27051	1991	1	4	36	10	0	0	0
27051	1991	1	5	36	10	0	0	0
27051	1991	1	6	36	10	0	0	0
27051	1991	1	7	36	10	0	0	0
27051	1991	1	8	38	10	0	0	0
27051	1991	1	9	38	10	0	0	0
27051	1991	1	10	38	10	0	0	0
27051	1991	1	11	38	10	0	0	0
27051	1991	1	12	45	10	0	0	0
27051	1991	1	13	46	10	0	0	0
27051	1991	1	14	46	10	0	0	0
27051	1991	1	15	42	10	0	0	0
27051	1991	1	16	43	10	0	0	0
27051	1991	1	17	45	10	0	0	0
27051	1991	1	18	45	10	0	0	0
27051	1991	1	19	45	10	0	0	0
27051	1991	1	20	46	10	0	0	0
27051	1991	1	21	46	10	0	0	0
27051	1991	1	22	47	10	0	0	0
27051	1991	1	23	41	10	0	0	0
27051	1991	1	24	47	10	0	0	0
27051	1991	1	25	49	10	0	0	0
27051	1991	1	26	50	10	0	0	0
27051	1991	1	27	50	10	0	0	0
27051	1991	1	28	50	10	0	0	0
27051	1991	1	29	50	10	0	0	0
27051	1991	1	30	50	10	0	0	0

Таблица 4.2.3 – Маршрутные снегосъемки

Индекс ВМО	Год	Месяц	Тип маршрута	День	Степень покрытия окрестности станции снегом	Степень покрытия маршрута снегом	Степень покрытия маршрута ледяной коркой	Средняя высота снежного покрова на маршруте	Наибольшая высота снежного покрова на маршр
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
27051	1991	11	1	20	10	10		4	9
27051	1991	11	2	20		10		4	8
27051	1991	12	1	10	10	10		14	19
27051	1991	12	2	10		10		14	19
27051	1991	12	1	20	10	10		10	16
27051	1991	12	2	20		10		11	18
27051	1991	12	1	31	10	10		22	30
27051	1992	1	1	10	10	10		34	42
27051	1992	1	1	20	10	10		40	50
27051	1992	1	2	20		10		38	48
27051	1992	1	1	31	10	10		48	60
27051	1992	1	2	31		10		50	66
27051	1992	2	1	10	10	10		44	57
27051	1992	2	2	10		10		45	60
27051	1992	2	1	20	10	10		53	65
27051	1992	2	2	20		10		55	67
27051	1992	2	1	29	10	10		54	61
27051	1992	2	2	29		10		60	72
27051	1992	3	1	10	10	10		46	73
27051	1992	3	2	10		10		45	61
27051	1992	3	1	15	10	10		45	62
27051	1992	3	2	15		10		44	64
27051	1992	3	1	20	10	10		60	69
27051	1992	3	2	20		10		60	68
27051	1992	3	1	25	10	10		49	62
27051	1992	3	2	25		10		51	60
27051	1992	3	1	31	10	10		17	33
27051	1992	3	2	31		10		25	39
27051	1992	4	1	5	8	10		9	13
27051	1992	4	2	5		10		10	15
27051	1992	4	1	10	8	7		4	13

Продолжение таблицы 4.2.3

Наименьшая высота снежного покрова на маршрут	Средняя плотность снега	Средняя толщина ледяной корки	Толщина слоя снега, насыщенного водой (мм)	Толщина слоя чистой воды (мм)	Запас воды в снеге (мм)	Запас воды, общий (мм)	Характер залегания снежного покрова	Характер снежного покрова
11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0.17				7	7	0	2
1	0.17				7	7	0	2
10	0.12				17	17	0	1
10	0.12				17	17	0	1
6	0.17				17	17	0	3
5	0.17				19	19	0	3
17	0.18				40	40	0	2
28	0.19				65	65	0	1
28	0.2				80	80	0	3
27	0.19				72	72	0	3
38	0.16				77	77	0	2
39	0.22				110	110	3	3
36	0.22				97	97	0	3
39	0.23				104	104	3	3
41	0.23				122	122	0	3
43	0.23				127	127	0	3
46	0.23				124	124	3	3
44	0.26				156	156	3	3
33	0.23				106	106	0	3
32	0.24				108	108	0	3
30	0.23				104	104	0	3
27	0.24				106	106	0	3
46	0.23				138	138	0	3
50	0.23				138	138	0	3
29	0.23				113	113	0	3
41	0.24				122	122	0	3
7	0.33				56	56	0	5
14	0.34				85	85	0	5
3	0.39				35	35	9	5
4	0.39				39	39	0	5

Таблица 4.2.4 – Список срочных наблюдений метеорологической станции

Синоптический индекс станции	Год по Гринвичу	Месяц по Гринвичу	День по Гринвичу	Срок по Гринвичу	Год источника (местный)	Месяц источника (местный)	День источника (местный)	Срок источника (местный)	Номер срока в сутках по ПДЗ В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22981	1991	1	1	0	1991	1	1	3	3
22981	1991	1	1	3	1991	1	1	6	4
22981	1991	1	1	6	1991	1	1	9	5
22981	1991	1	1	9	1991	1	1	12	6
22981	1991	1	1	12	1991	1	1	15	7
22981	1991	1	1	15	1991	1	1	18	8
22981	1991	1	1	18	1991	1	2	21	1
22981	1991	1	1	21	1991	1	2	0	2
22981	1991	1	2	0	1991	1	2	3	3
22981	1991	1	2	3	1991	1	2	6	4
22981	1991	1	2	6	1991	1	2	9	5
22981	1991	1	2	9	1991	1	2	12	6
22981	1991	1	2	12	1991	1	2	15	7
22981	1991	1	2	15	1991	1	2	18	8
22981	1991	1	2	18	1991	1	3	21	1
22981	1991	1	2	21	1991	1	3	0	2
22981	1991	1	3	0	1991	1	3	3	3
22981	1991	1	3	3	1991	1	3	6	4
22981	1991	1	3	6	1991	1	3	9	5
22981	1991	1	3	9	1991	1	3	12	6
22981	1991	1	3	12	1991	1	3	15	7
22981	1991	1	3	15	1991	1	3	18	8
22981	1991	1	3	18	1991	1	4	21	1
22981	1991	1	3	21	1991	1	4	0	2
22981	1991	1	4	0	1991	1	4	3	3
22981	1991	1	4	3	1991	1	4	6	4
22981	1991	1	4	6	1991	1	4	9	5
22981	1991	1	4	9	1991	1	4	12	6
22981	1991	1	4	12	1991	1	4	15	7
22981	1991	1	4	15	1991	1	4	18	8
22981	1991	1	4	18	1991	1	5	21	1
22981	1991	1	4	21	1991	1	5	0	2

Продолжение таблицы 4.2.4

Время местное	Номер часового пояса	Начало метеорологических суток по ПДЗВ	Горизонтальная дальность видимости	Общее количество облачности	Количество облачности нижнего яруса	Форма облаков верхнего яруса	Форма облаков среднего яруса	Форма облаков вертикального развития	Слоистые и слоисто-кучевые облака
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	3	19	56	10	10	8	8	0	0
7	3	19	50	10	10	8	8	0	0
10	3	19	58	10	10	8	8	0	0
13	3	19	58	10	10	8	8	0	0
16	3	19	59	10	10	8	8	0	0
19	3	19	58	10	10	8	8	0	0
22	3	19	50	10	10	8	8	0	0
1	3	19	56	10	10	8	8	0	0
4	3	19	50	10	10	8	8	0	0
7	3	19	50	10	10	8	8	0	0
10	3	19	58	10	10	8	8	0	0
13	3	19	58	10	0	8	2	0	0
16	3	19	84	4	0	0	1	0	0
19	3	19	99	10	10	8	8	0	2
22	3	19	99	10	10	8	8	0	4
1	3	19	99	10	10	8	8	0	1
4	3	19	99	10	10	8	8	0	2
7	3	19	99	0	0	0	0	0	0
10	3	19	84	3	0	1	0	0	0
13	3	19	84	5	0	1	0	0	0
16	3	19	84	3	0	1	0	0	0
19	3	19	99	1	0	1	0	0	0
22	3	19	99	0	0	0	0	0	0
1	3	19	99	0	0	0	0	0	0
4	3	19	99	10	0	1	0	0	0
7	3	19	99	6	0	1	0	0	0
10	3	19	56	0	0	0	0	0	0
13	3	19	56	2	0	1	0	0	0
16	3	19	40	0	0	0	0	0	0
19	3	19	99	0	0	0	0	0	0
22	3	19	99	0	0	0	0	0	0
1	3	19	99	0	0	0	0	0	0

Продолжение таблицы 4.2.4

Слоисто- дожд,разорв анно- дождевые облака	Высота нижней границы облачно сти	Признак наличия облачно сти ниже уровня станции	Погод а межд у срока ми	Погода в срок наблюде ния	Направле ние ветра	Средн я скоро сть ветра	Максимальная скорость ветра	Сумма осадков	Температура поверхности почвы
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
6	310		7	71	170	2	4	0	-3.5
6	350		7	71	230	2	5	3.4	-3
2	720		7	71	330	3	6	0	-3.4
6	340		7	71	310	4	7	0	-4.6
2	490		7	71	330	4	7	0	-6.2
2	470		7	71	340	4	9	1	-7.4
2	530		7	71	340	5	8	0	-7.8
2	570		7	71	335	5	11	0	-10.4
2	600		7	71	320	4	7	0	-10.8
2	500		7	71	310	3	6	0.2	-10
6	410		7	71	310	1	3	0	-9.3
0			7	71	190	2	6	0	-10.3
0			7	2	270	3	4	0	-17.2
0	600		1	2	300	2	5	0.2	-17.4
0	460		1	2	320	2	4	0	-13
0	430		2	2	310	4	7	0	-15.4
0	750		2	2	300	3	5	0	-22.5
0			1	2	280	1	5	0	-32.1
0			1	2	999	1	4	0	-32.5
0			1	2	999	1	3	0	-30
0			1	2	0	0	2	0	-32.5
0			0	2	340	2	3	0	-33.2
0			0	2	350	2	3	0	-34
0			0	2	20	1	2	0	-42.6
0			1	2	0	0	3	0	-31.4
0			2	2	0	0	3	0	-32.5
0			1	4	350	2	4	0	-36.5
0			0	4	360	2	4	0	-33.4
0			0	4	0	0	2	0	-33
0			0	2	999	1	4	0	-34
0			0	2	999	1	3	0	-34.9
0			0	2	0	0	4	0	-37.6

Продолжение таблицы 4.2.4

Температура пов. почвы по мин. терм-ру	Мин. температура пов-сти почвы между сроками	Макс. температура пов-сти почвы между сроками	Температура пов-сти почвы по макс. терм-ру п/встр.	Температура воздуха по сухому терм-ру	Темп.воздуха по смоченному терм-ру	Температура воздуха по мин. терм-ру	Мин.температура воздуха между сроками	Макс. температура воздуха между сроками	Температура воздуха по макс. терм-ру после встрях.
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	-3.1	-3.2	-3.1	-3.4	-3.1	-3.1
-3	-3.5	-3	-3	-2.9	-3	-2.9	-3.1	-2.9	-2.9
-3.4	-3.5	-3	-3.4	-3.2	-3.5	-3.2	-3.3	-2.9	-3.2
-4.6	-4.6	-3.4	-4.6	-5.5	-5.8	-5.5	-5.5	-3.2	-5.5
-6.2	-6.2	-4.6	-6.2	-6.7	-6.9	-6.7	-6.7	-5.5	-6.7
-7.4	-7.4	-6.2	-7.4	-7.2	-7.5	-7.2	-8.2	-6.7	-7.2
-7.8	-7.8	-7.4	-7.8	-7.9	-8.2	-7.9	-8	-7.2	-7.9
-10.4	-10.4	-7.8	-10.4	-9.5	-10	-9.5	-9.5	-7.9	-9.5
-10.8	-10.8	-10.4	-10.8	-9.9	-10.2	-9.9	-10.4	-9.5	-9.9
-10	-10.8	-10	-10	-9.3	-9.6	-9.3	-9.9	-9.3	-9.3
-9.3	-10	-9.3	-9.3	-9.2	-9.5	-9.2	-9.3	-9.2	-9.2
-10.3	-10.3	-9.3	-10.3	-10.1		-10.1	-10.1	-9.2	-10.1
-17.2	-17.2	-10.3	-17.2	-13.9		-13.9	-13.9	-10.1	-13.9
-17.4	-17.5	-17.2	-17.4	-13.3		-13.3	-15.6	-13.3	-13.3
-13	-17.4	-13	-13	-13.4		-13.4	-13.4	-13.3	-13.4
-15.4	-15.4	-13	-15.4	-16.1		-16.1	-16.1	-13.4	-16.1
-22.5	-22.5	-15.4	-22.5	-22.3		-22.3	-22.3	-16.1	-22.3
-32.1	-32.1	-22.5	-32.1	-27.3		-27.3	-27.3	-22.3	-27.3
-32.5	-32.5	-32.1	-32.5	-28.8		-28.8	-29.4	-27.3	-28.8
-30	-32.5	-30	-30	-28.8		-28.8	-29.9	-28.8	-28.8
-32.5	-32.5	-30	-32.5	-29.4		-29.4	-29.4	-28.8	-29.4
-33.2	-33.2	-32.5	-33.2	-32		-32	-32	-29.4	-32
-34	-34	-33.2	-34	-34		-34	-34	-32	-34
-42.6	-42.6	-34	-42.6	-35.2		-35.2	-35.2	-34	-35.2
-31.4	-42.6	-31.4	-31.4	-35.3		-35.3	-35.3	-35.2	-35.3
-32.5	-32.5	-31.4	-32.5	-35		-35	-36.9	-35	-35
-36.5	-36.5	-32.5	-36.5	-35.7		-35.7	-35.8	-35	-35.7
-33.4	-36.5	-33.4	-33.4	-33.8		-33.8	-35.7	-33.8	-33.8
-33	-33.4	-33	-33	-33.9		-33.9	-33.9	-33.1	-33.9
-34	-34	-33	-34	-34.3		-34.3	-35.4	-33.9	-34.3
-34.9	-34.9	-34	-34.9	-34.5		-34.5	-34.5	-34.3	-34.5
-37.6	-37.8	-34.9	-37.6	-36.9		-36.9	-36.9	-34.5	-34.5

Продолжение таблицы 4.2.4

Парциальное давление водяного пара	Относительная влажность воздуха	Дефицит насыщения водяного пара	Температура точки росы	Атмосферное давление на уровне станции	Атмосферное давление на уровне моря	Характеристика барической тенденции	Величина барической тенденции
41	42	43	44	45	46	47	48
4.61	95	0.25	-3.8	978.5	990.8	7	0.8
4.69	95	0.24	-3.6	978.1	990.4	7	0.4
4.35	90	0.47	-4.6	978.3	990.6	3	0.2
3.54	87	0.52	-7.3	980.1	992.5	3	1.8
3.27	88	0.43	-8.3	981.8	994.3	2	1.7
3.02	85	0.54	-9.3	984	996.6	2	2.2
2.83	84	0.54	-10.1	985.9	998.5	2	1.9
2.25	76	0.73	-13	988.4	1001.1	3	2.5
2.34	81	0.54	-12.5	990.4	1003.1	2	2
2.48	82	0.54	-11.8	991.8	1004.5	1	1.4
2.5	82	0.55	-11.7	993.6	1006.4	2	1.8
2.27	82	0.57	-12.9	995	1007.8	2	1.4
1.78	85	0.31	-15.9	996.4	1009.4	2	1.4
1.87	83	0.33	-15.3	998.2	1011.3	2	1.8
1.74	80	0.44	-16.1	999	1012.1	1	0.8
1.4	79	0.35	-18.7	1000.7	1013.9	3	1.7
0.77	77	0.26	-25.5	1002.4	1016	2	1.7
0.52	77	0.13	-29.8	1003.2	1017.1	1	0.7
0.43	76	0.14	-31.8	1004.1	1018.1	2	0.9
0.43	76	0.14	-31.8	1004.6	1018.6	2	0.5
0.41	76	0.14	-32.4	1004.8	1018.8	2	0.2
0.32	74	0.11	-35	1004.9	1019.1	2	0.1
0.25	72	0.11	-37.5	1005.1	1019.5	2	0.2
0.22	71	0.09	-38.7	1004.6	1019	8	0.5
0.21	71	0.09	-39	1004.6	1019	4	0
0.22	70	0.09	-38.7	1004.9	1019.3	3	0.3
0.2	71	0.09	-39.3	1004.8	1019.2	8	0.1
0.25	70	0.11	-37.5	1005.3	1019.5	3	0.5
0.25	71	0.11	-37.5	1005.5	1019.7	2	0.2
0.24	71	0.1	-37.8	1005.3	1019.7	8	0.2
0.23	70	0.1	-38.1	1006.2	1020.6	3	0.9
0.18	69	0.08	-40.4	1006.1	1020.6	8	0.1

Таблица 4.2.5 – Данные средних суточных наблюдений за температурой и осадками

Индекс ВМО	Год	Месяц	День	Общий признак качества температуры	Минимальная температура воздуха	Средняя температура воздуха	Максимальная температура воздуха	Количество осадков
27051	1991	1	1	0	-10.6	-4.2	-1	1.4
27051	1991	1	2	0	-11.9	-9.7	-7.5	0.2
27051	1991	1	3	0	-31.2	-24.8	-11.9	0
27051	1991	1	4	0	-34.3	-31.6	-28.9	0
27051	1991	1	5	0	-33.9	-31.4	-27.5	0
27051	1991	1	6	0	-30.2	-26.4	-22.3	0.9
27051	1991	1	7	0	-25.7	-18.2	-8.3	1.1
27051	1991	1	8	0	-8.3	-0.2	1.2	1.8
27051	1991	1	9	0	-0.1	0.3	1.3	1.7
27051	1991	1	10	0	-1.1	-0.1	1.1	2.1
27051	1991	1	11	0	0	0.5	1.1	7.5
27051	1991	1	12	0	-11.7	-6.4	2.5	2.8
27051	1991	1	13	0	-19.1	-16.3	-10.9	0
27051	1991	1	14	0	-21	-17.8	-13.7	0.5
27051	1991	1	15	0	-18.4	-14.5	-11	0.4
27051	1991	1	16	0	-19.7	-10.3	-4.4	0.8
27051	1991	1	17	0	-4.4	-1.7	1.2	1.5
27051	1991	1	18	0	-3.7	-2.3	0.2	0
27051	1991	1	19	0	-6.6	-3.5	0.7	0.1
27051	1991	1	20	0	-2.6	-0.9	1	0
27051	1991	1	21	0	-5.6	-4.1	-2.3	2.2
27051	1991	1	22	0	-5.7	-4.4	-3.1	0
27051	1991	1	23	0	-4.8	-2.4	0.2	0
27051	1991	1	24	0	-10	-4.2	0.9	1.5
27051	1991	1	25	0	-13.7	-10.7	-7.5	1.6
27051	1991	1	26	0	-24.2	-13.7	-7.7	4.1
27051	1991	1	27	0	-28.9	-26.9	-23.9	0
27051	1991	1	28	0	-32.8	-28.5	-23.1	0
27051	1991	1	29	0	-33.4	-29.5	-23.4	0
27051	1991	1	30	0	-36.8	-32.6	-27.3	0
27051	1991	1	31	0	-36.1	-32.1	-24.2	0

5 Прогнозирование стока р. Сухоны

5.1 Водно-балансовый метод

Собраны и проанализированы исходные данные, необходимые для построения уравнения водного баланса весеннего половодья.

Таблица 5.1.1 – Составляющие уравнения водного баланса

М.ст / Пост	Год	дата макс. снегозап. по снегосьемк	дата схода снега	X_1 , мм	дата окончания ВП	X_2 , мм	S поле, мм	S поле, дата	S лес, мм
Тотьма / Тотьма	91-92	29.02.1992	18.04.1992	69	23.06	94	124	29.02.1992	156
	92-93	10.03.1993	27.04.1993	111	04.06	15	180	10.03.1993	180
	93-94	25.03.1994	22.04.1994	23	17.05	37	190	25.03.1994	190
	94-95	05.04.1995	16.04.1995	40	30.06	112	175	05.04.1995	171
В.Устюг / Каликино	91-92	15.03.1992	21.04.1992	67	28.06	66	143	15.03.1992	-
	92-93	20.02.1993	01.05.1993	113	29.05	23	185	20.02.1993	-
	93-94	31.03.1994	19.04.1994	5	17.05	54	183	31.03.1994	-
	94-95	28.02.1995	16.04.1995	63	29.06	109	150	28.02.1995	-

Таблица 5.1.2 – Результаты расчета

М.ст / Пост	Год	Y , мм	S , мм	X_1 , мм	X_2 , мм	P , мм
Тотьма / г. Тотьма	91-92	188	124	69	94	99
	92-93	147	180	111	15	159
	93-94	107	190	23	37	143
	94-95	200	175	40	112	127
В.Устюг / д. Каликино	91-92	189	143	67	66	88
	92-93	150	185	113	23	170
	93-94	133	183	5	54	109
	94-95	202	150	63	109	119

Суммарные потери талых вод не имеют устойчивой линейной связи, величина достоверности аппроксимации (R^2) составляет 0.13-0.40.

5.2 Статистический метод

Построены прогнозные модели, позволяющие вычислить расход воды весеннего половодья р. Сухона в замыкающем створе – д. Каликино. В процессе исследования подобраны предикторы, дающие наиболее тесную связь при построении прогнозной модели – максимальные расходы воды весеннего половодья г/п р. Сухона – г. Тотьма (со сдвижкой 1 сутки), средние суточные осадки и средняя температура воздуха по м/ст Тотьма.

Эффективность прогноза по регрессионному методу приведена в таблице 5.2.2.

Таблица 5.2.1 – Коэффициенты парной корреляции расходов и уровней воды исходных рядов за 1993 г.

	Рабаньга, Н	Рабаньга, Q	Наремы, Н	Тотьма, Н	Тотьма, Q	Б.Слоб., Н	Порог, Н	Каликино, Н	Каликино, Q	В.Устюг, Н
Рабаньга, Н	1	0.89	0.97	0.84	0.75	0.79	0.63	0.59	0.64	0.72
Рабаньга, Q	0.89	1	0.80	0.59	0.54	0.53	0.39	0.37	0.49	0.51
Наремы, Н	0.97	0.80	1	0.93	0.87	0.88	0.77	0.75	0.76	0.84
Тотьма, Н	0.84	0.59	0.93	1	0.96	0.97	0.91	0.89	0.86	0.93
Тотьма, Q	0.75	0.54	0.87	0.96	1	0.93	0.90	0.92	0.93	0.93
Б.Слоб., Н	0.79	0.53	0.88	0.97	0.93	1	0.96	0.92	0.87	0.96
Порог, Н	0.63	0.39	0.77	0.91	0.90	0.96	1	0.97	0.88	0.97
Каликино, Н	0.59	0.37	0.75	0.89	0.92	0.92	0.97	1	0.93	0.96
Каликино, Q	0.64	0.49	0.76	0.86	0.93	0.87	0.88	0.93	1	0.92
В.Устюг, Н	0.72	0.51	0.84	0.93	0.93	0.96	0.97	0.96	0.92	1

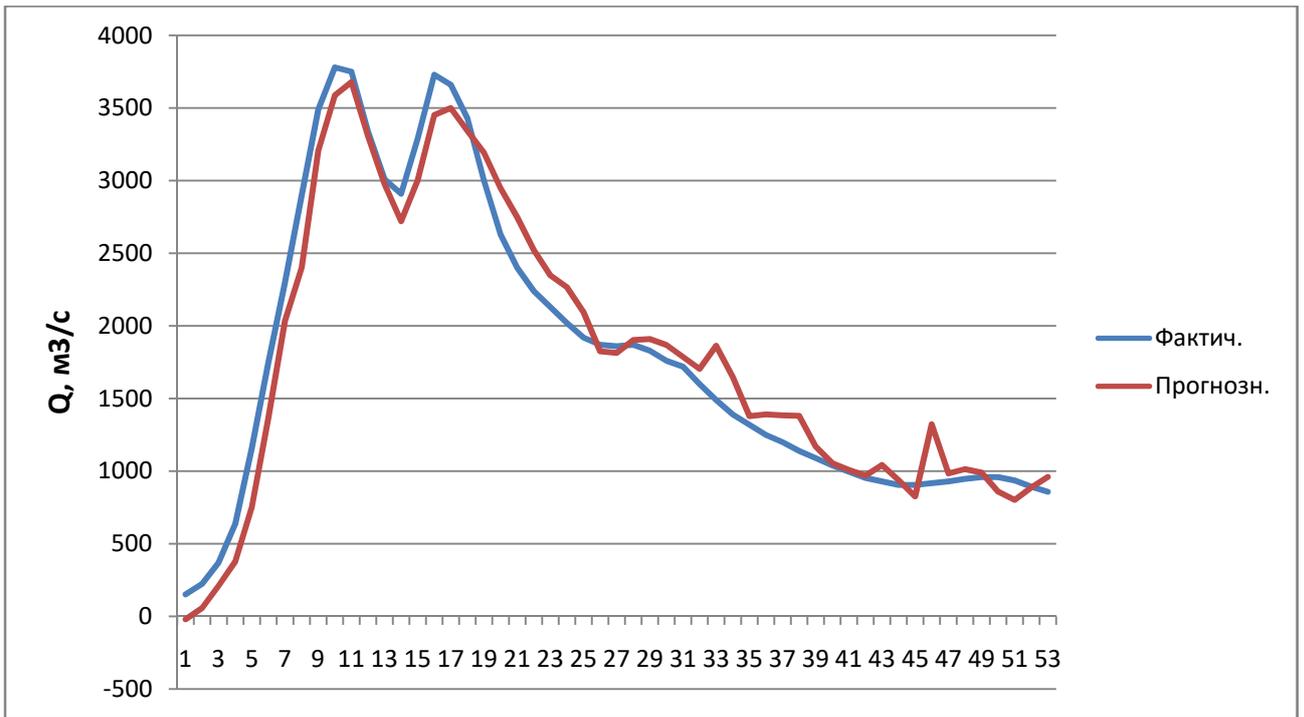


Рисунок 5.2.1 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды г/п р. Сухона – д. Каликино за 1991 г.

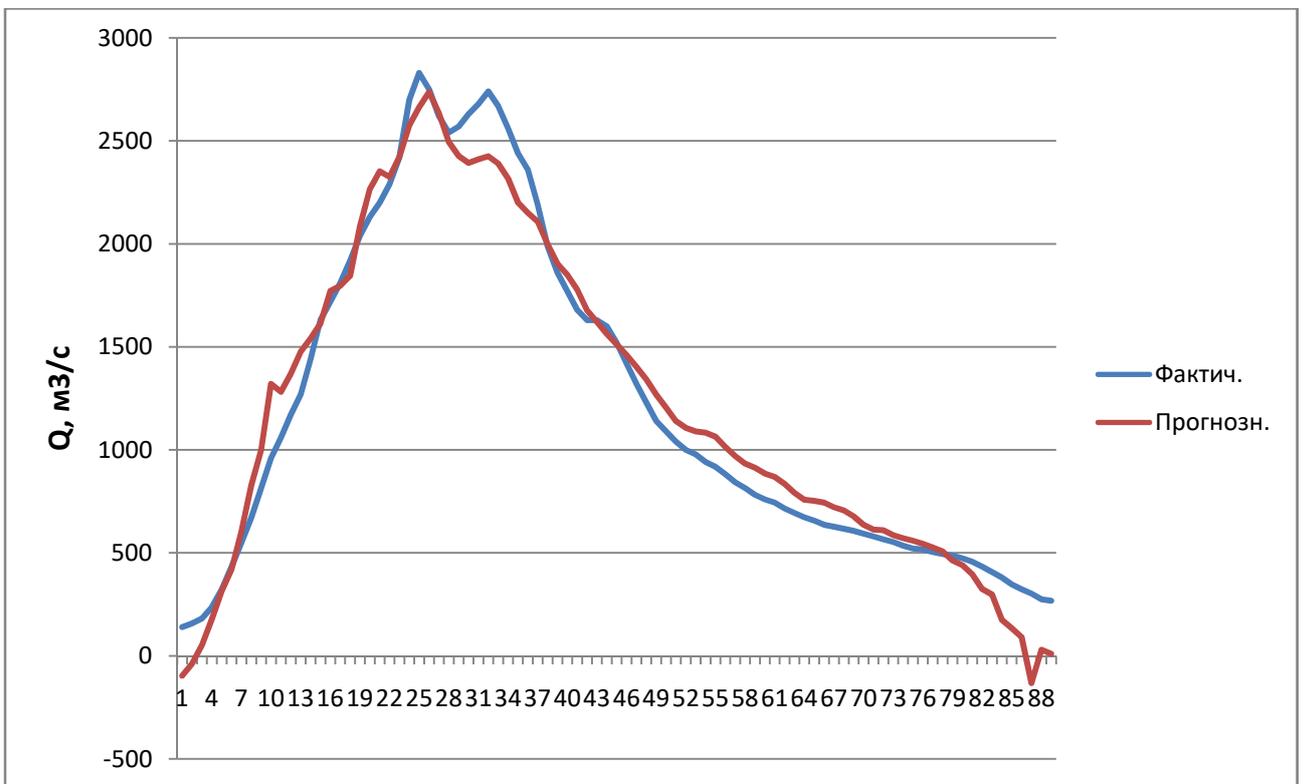


Рисунок 5.2.2 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды г/п р. Сухона – д. Каликино за 1992 г.

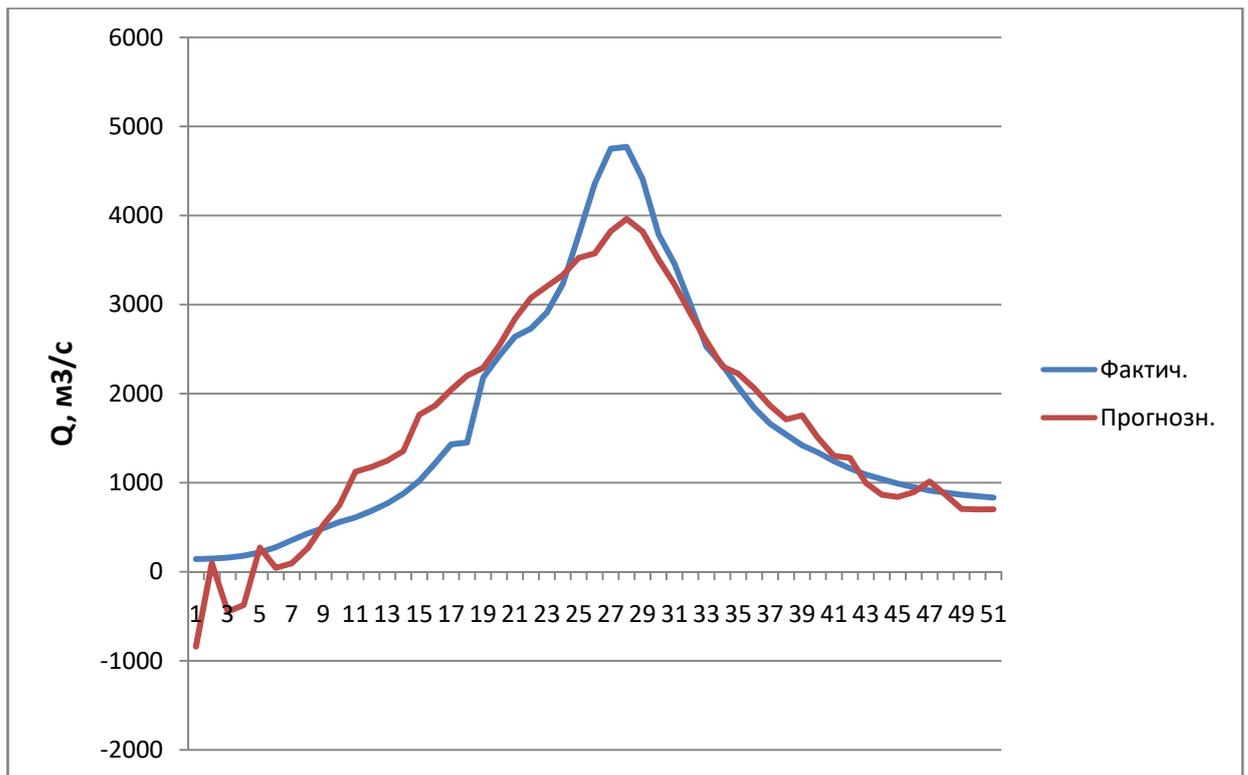


Рисунок 5.2.3 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды г/п р. Сухона – д. Каликино за 1993 г.

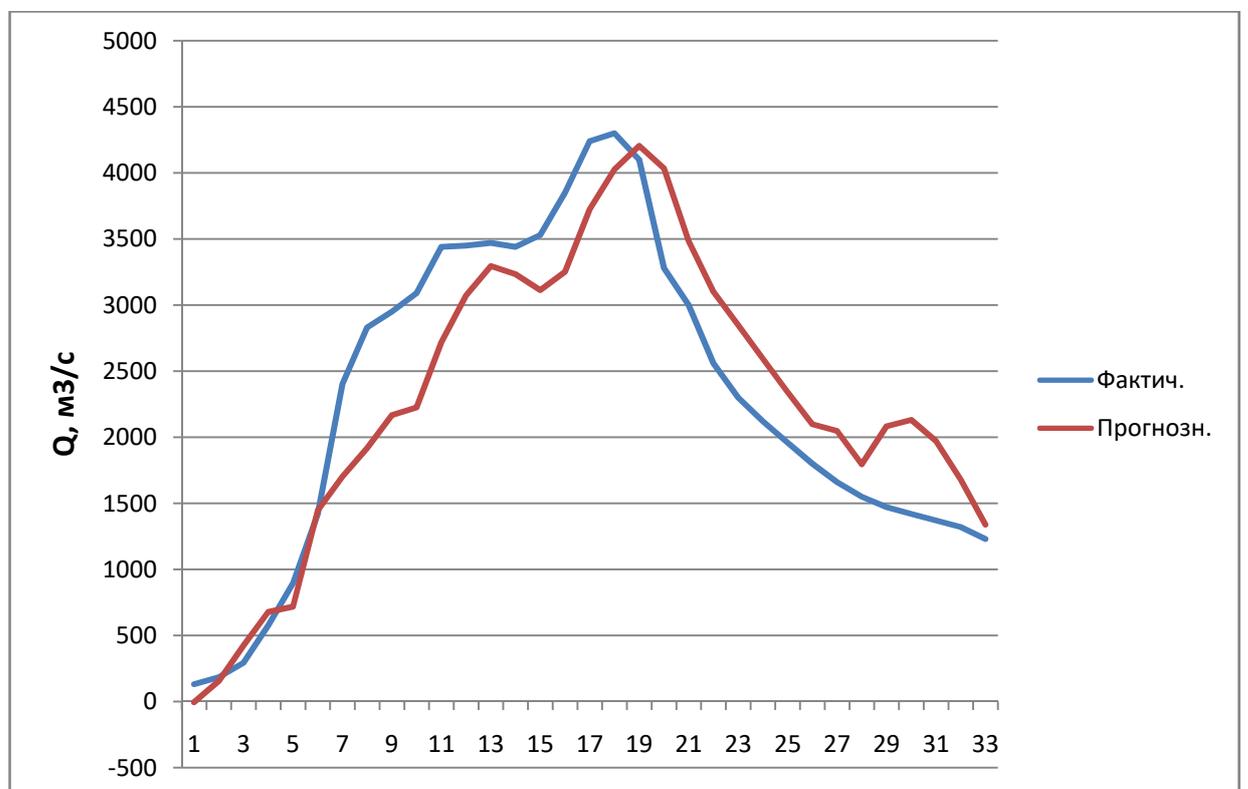


Рисунок 5.2.4 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды г/п р. Сухона – д. Каликино за 1994 г.

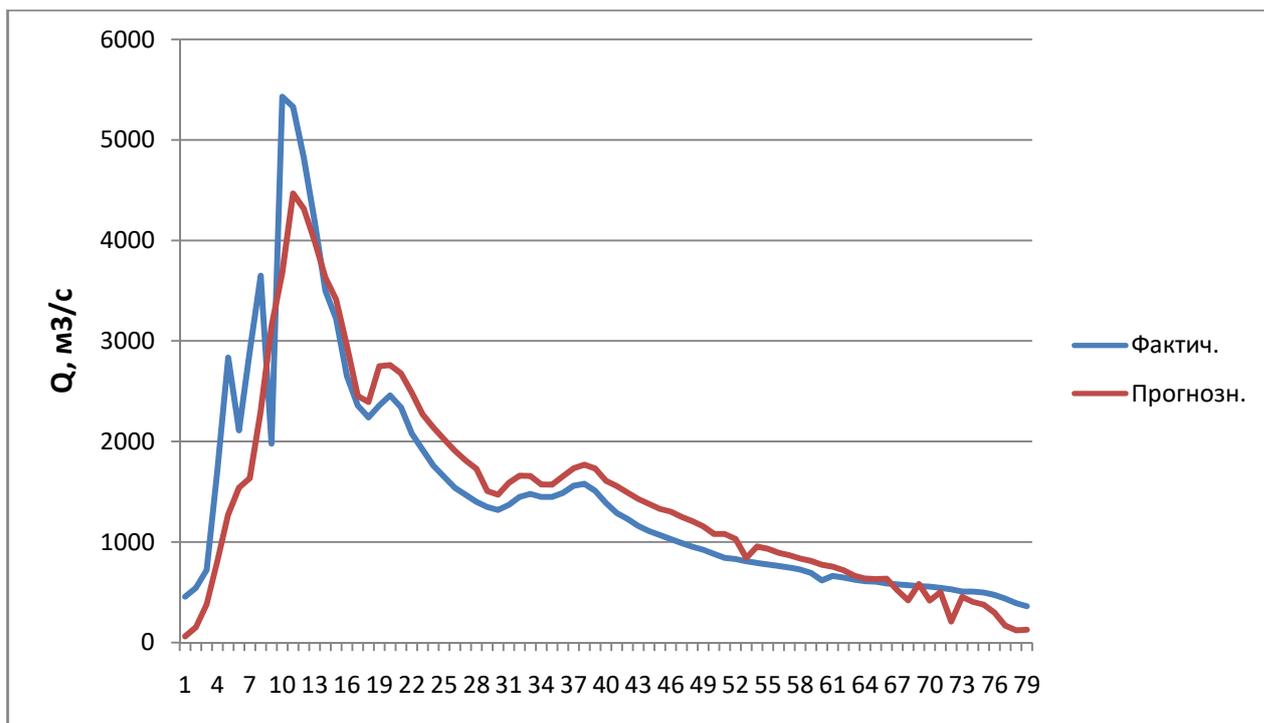


Рисунок 5.2.5 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды г/п р. Сухона – д. Каликино за 1995 г. (по модели 1995 г.)

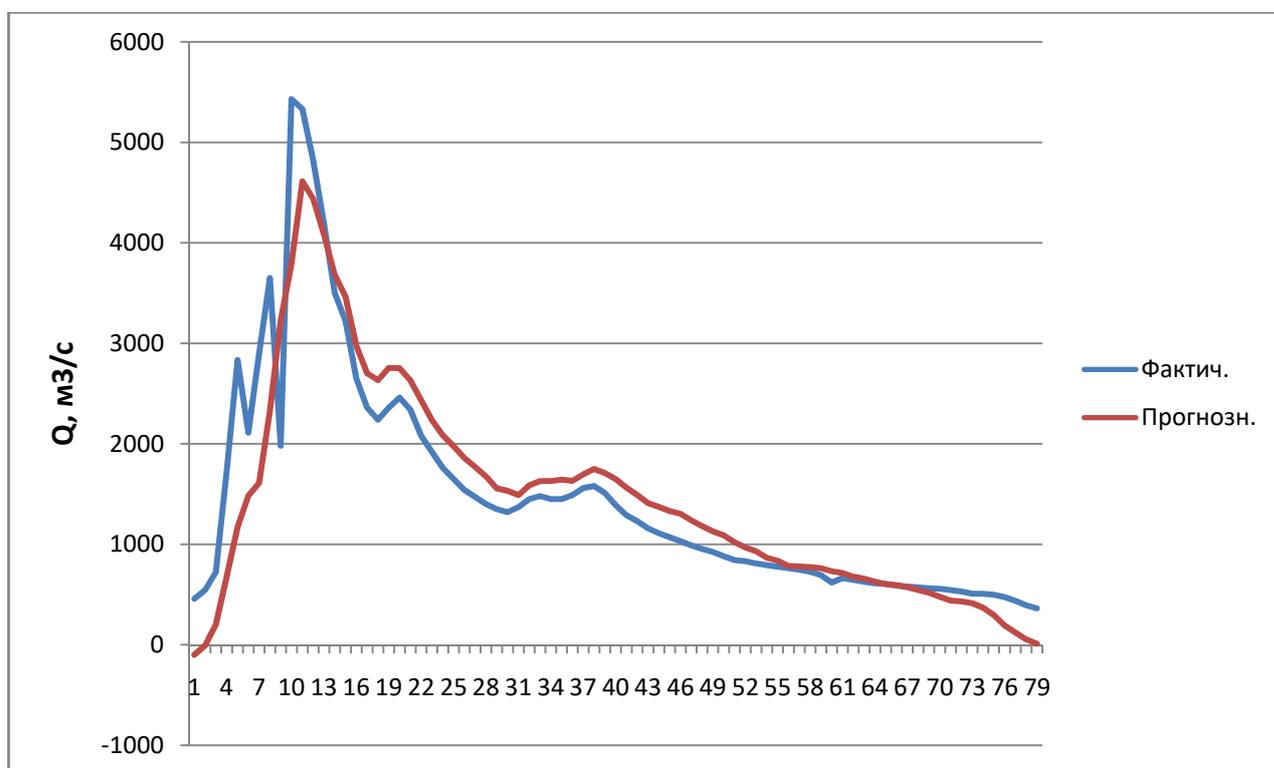


Рисунок 5.2.6 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды г/п р. Сухона – д. Каликино за 1995 г. (по модели 1991-1994 гг.)

Таблица 5.2.2 – Эффективность прогноза по регрессионному методу

Год	S	σ	ϕ
1991	206	1015	0,20
1992	145	811	0,18
1993	403	1303	0,31
1994	495	1222	0,40
1995 (модель 1995 г.)	453	1119	0,41
1995 (модель 1991-1994 гг.)	461	1119	0,41

Рекомендуемая для расчетов формула имеет вид:

$$Q_{\text{Каликино}} = 2.03 * Q_{\text{Тотьма}} + (-0.43) * X + 5.23 * t_{\text{ср}}$$

5.3 Способ нелинейной тенденции

Исследована возможность применения универсальной формулы методом нелинейной тенденции для р. Сухоны. Выполнен подбор параметра m (показатель, учитывающий форму кривой спада). Анализ полученных результатов показал применимость формулы, при увеличении значения $t_{\text{спада}}$ корректировки параметра m (до значений 0.8-1.25).

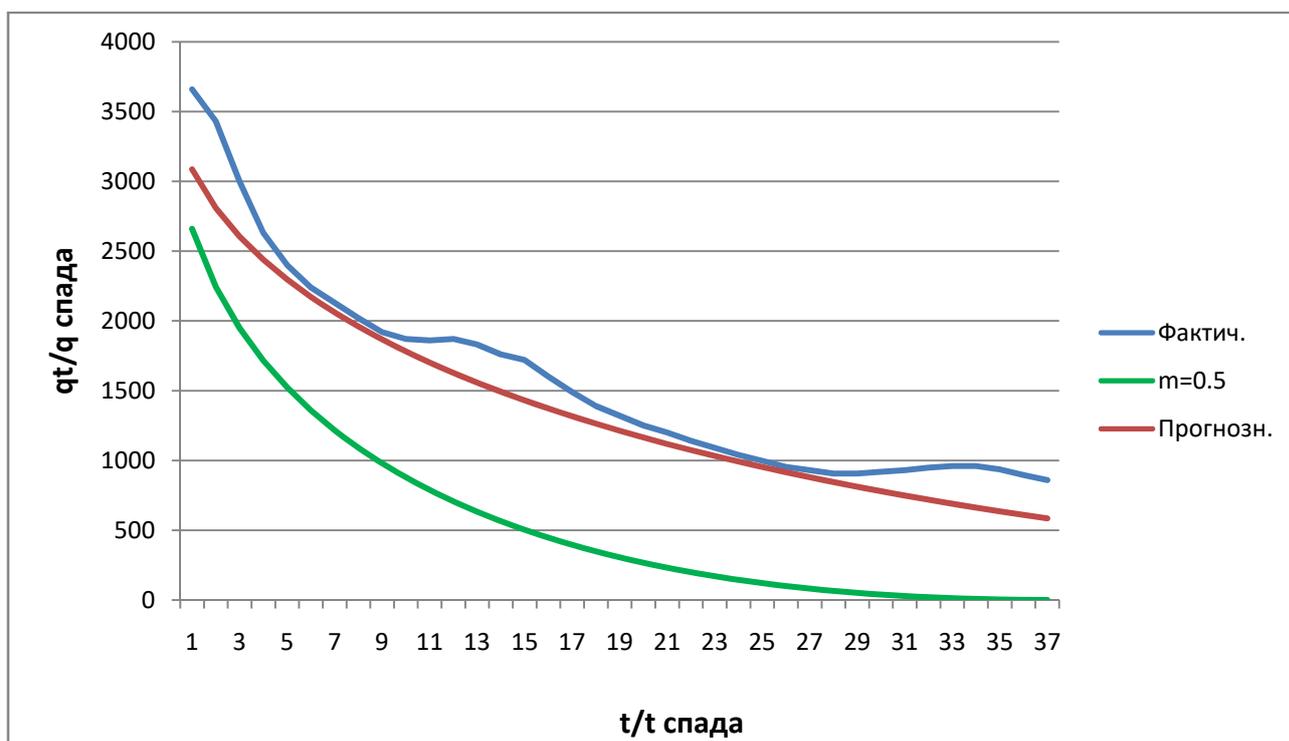


Рисунок 5.3.1 – Совмещенные графики фактических ($t_{\text{спада}}=37$ дней) и спрогнозированных расходов вод ($t_{\text{спада}}=100$ дней) 1991 г.

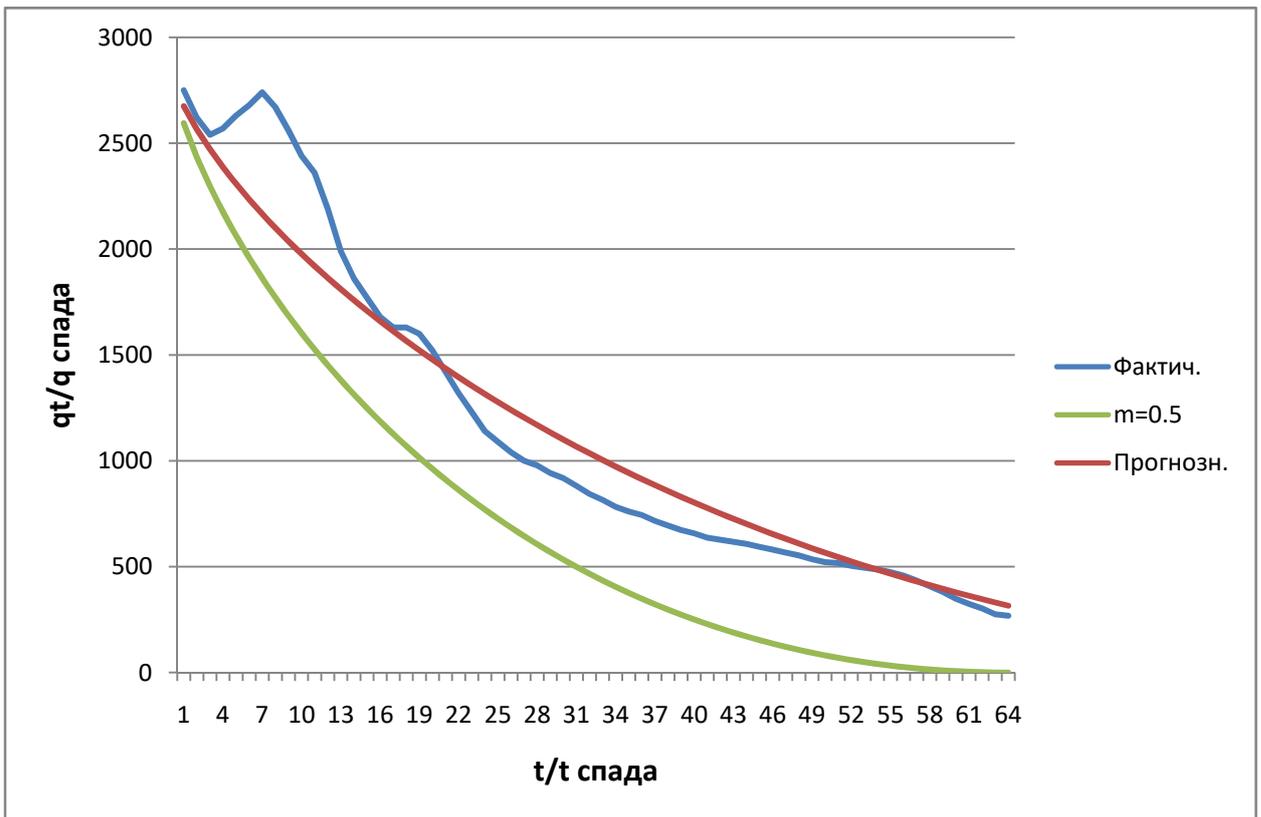


Рисунок 5.3.2 – Совмещенные графики фактических ($t_{\text{спада}}=64$ дня) и спрогнозированных расходов вод ($t_{\text{спада}}=110$ дней) 1992 г.

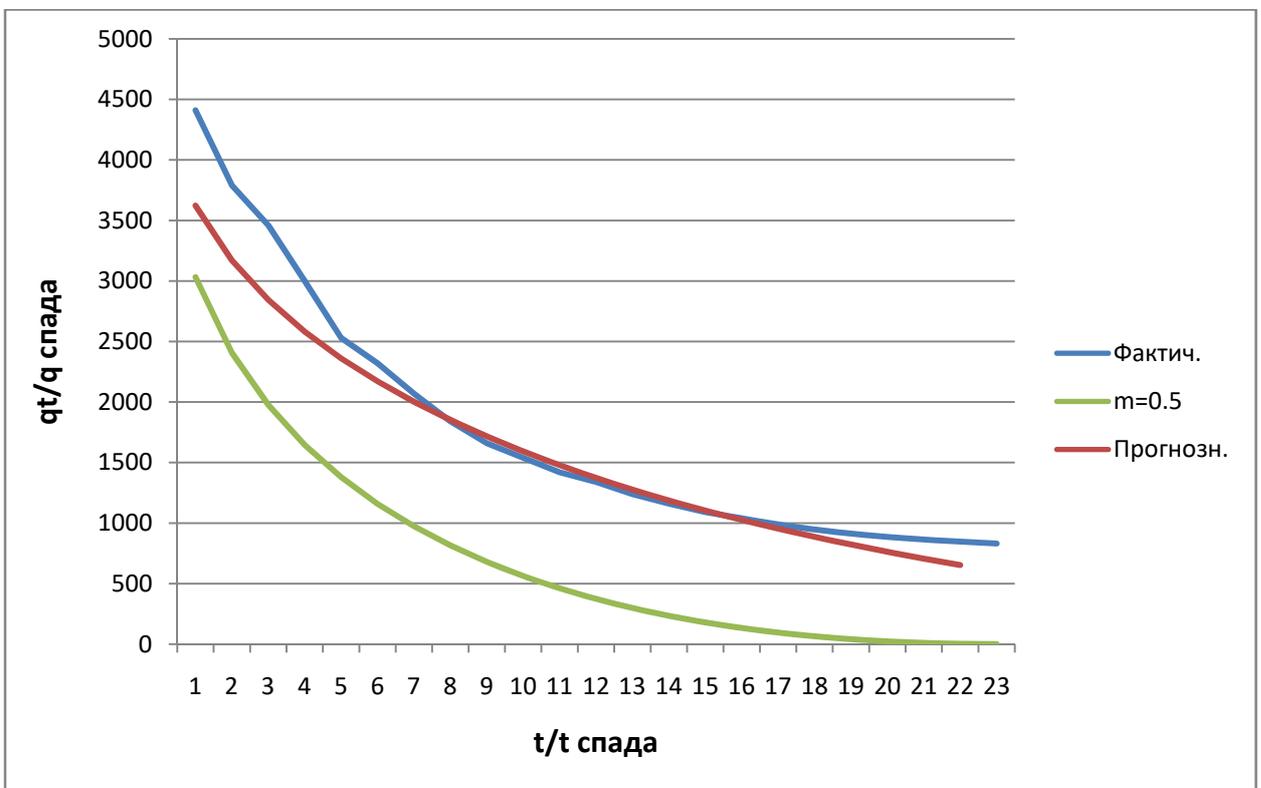


Рисунок 5.3.3 – Совмещенные графики фактических ($t_{\text{спада}}=23$ дня) и спрогнозированных расходов вод ($t_{\text{спада}}=55$ дней) 1993 г.

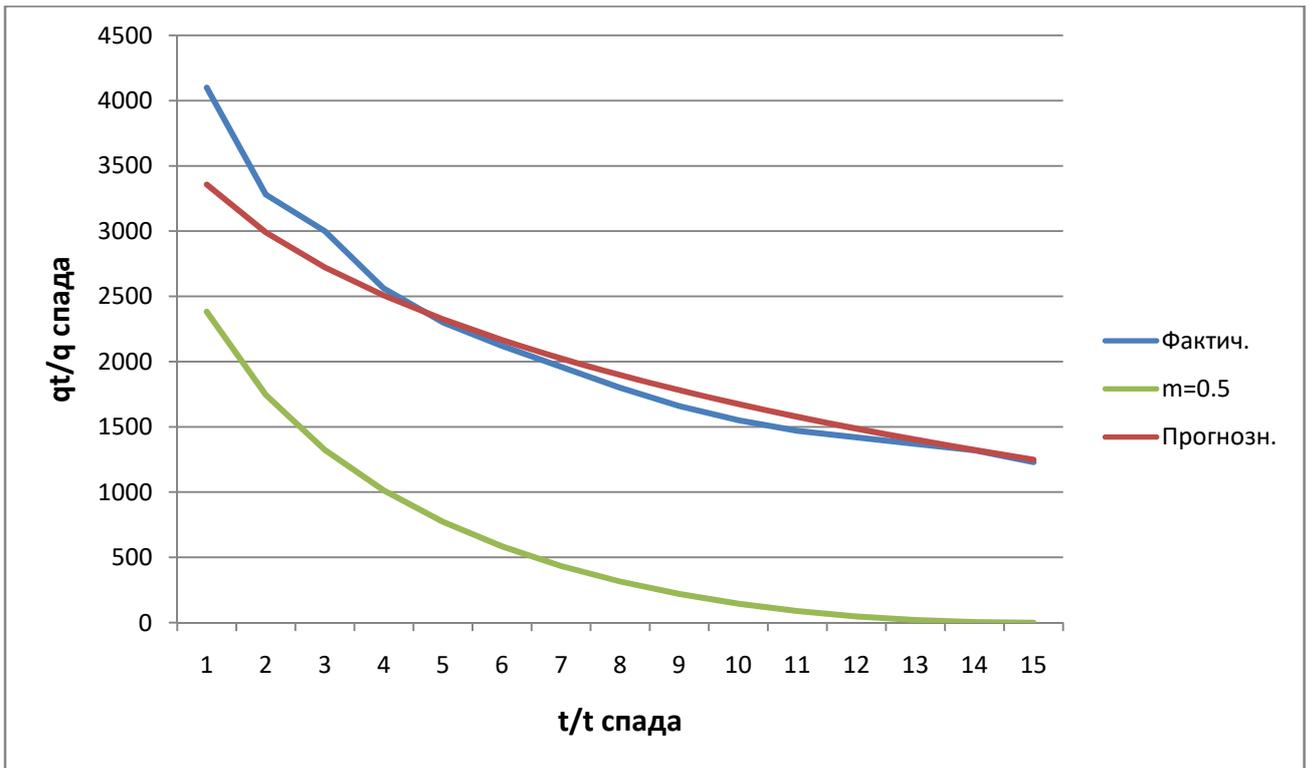


Рисунок 5.3.4 – Совмещенные графики фактических ($t_{\text{спада}}=15$ дней) и спрогнозированных расходов вод ($t_{\text{спада}}=70$ дней) 1994 г.

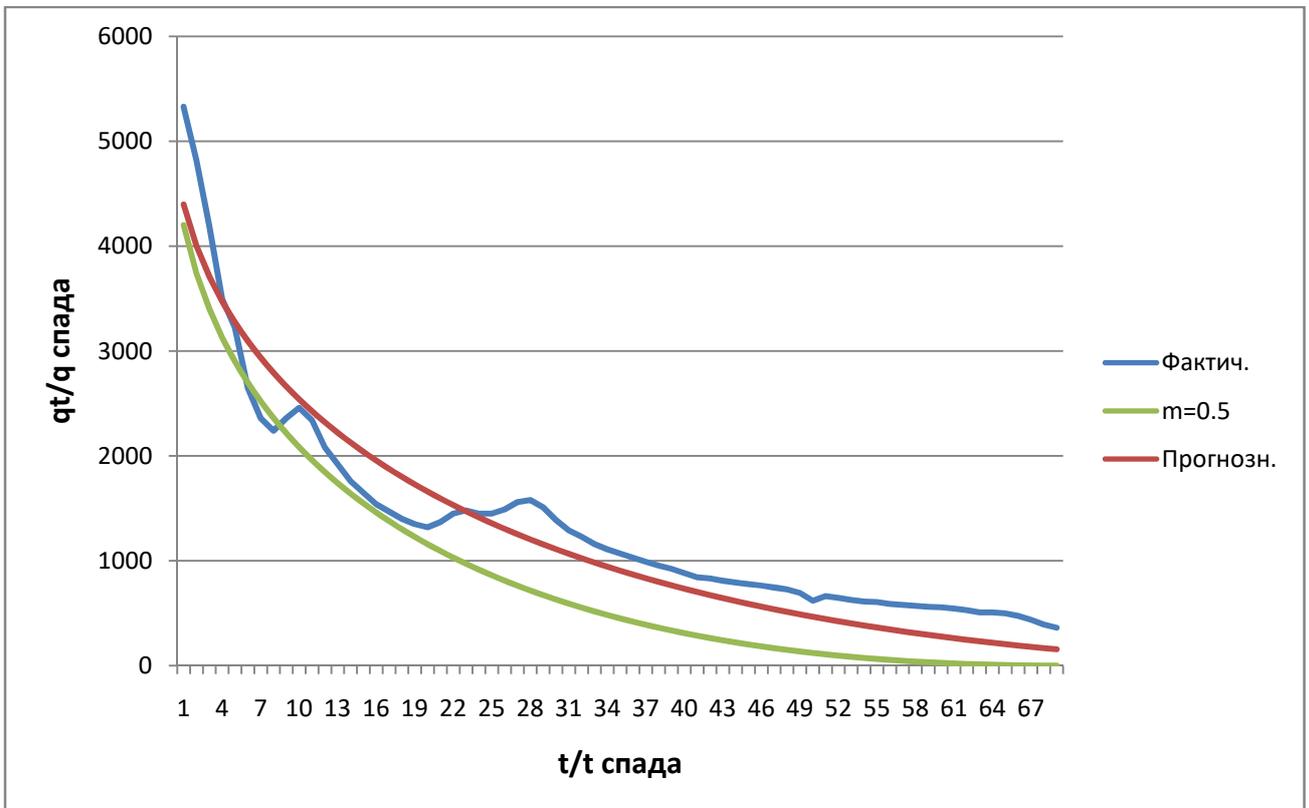


Рисунок 5.3.5 – Совмещенные графики фактических ($t_{\text{спада}}=69$ дней) и спрогнозированных расходов вод ($t_{\text{спада}}=100$ дней) 1995 г.

Таблица 5.3.1 – Эффективность прогноза

Год	<i>n</i> факт., дни	<i>n</i> прогн., дни	<i>S</i>	σ	ϕ
1991	37	100	321	1015	0.23
1992	64	110	200	795	0.25
1993	23	55	234	1039	0.27
1994	15	70	236	837	0.28
1995	69	100	305	1009	0.30

5.4 Методика динамического фонового прогноза изменения водности

Приведен пример расчета модели склонового стока первого и второго порядка, в период снеготаяния.

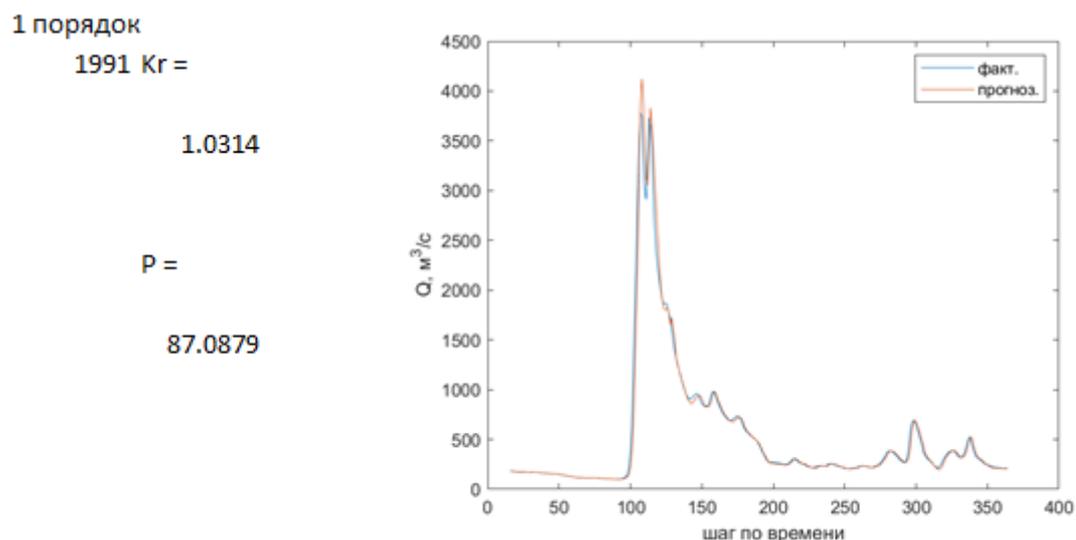


Рисунок 5.4.1 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод первого порядка за 1991 г.

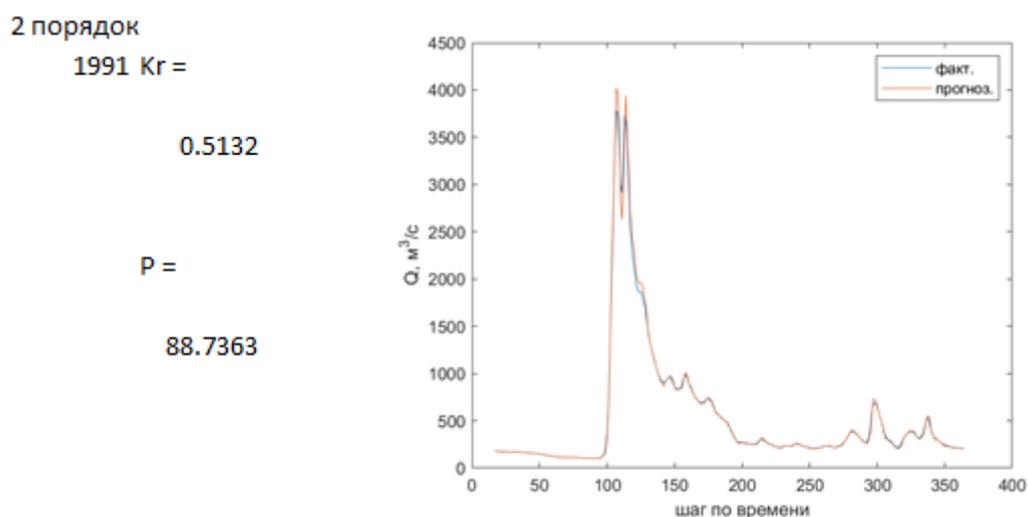


Рисунок 5.4.2 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод второго порядка за 1991 г.

1 порядок со снегом

1991 Kr =

0.3303

P =

81.8182

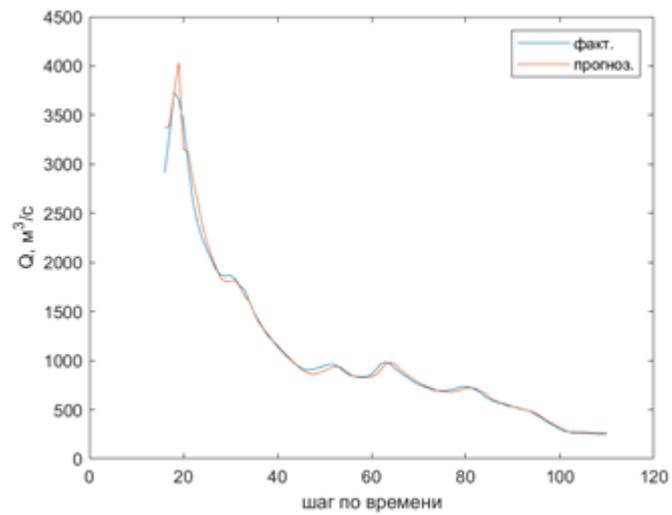


Рисунок 5.4.3 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод в период снеготаяния.

Заключение

В рамках данной работы были собраны данные наблюдений расходных и уровенных гидрологических постов, метеорологических станций бассейна р. Сухоны.

Выполнен анализ имеющихся архивных материалов Вологодского ЦГМС, выбран период непрерывных наблюдений с 1991 по 1995 гг. (с отсутствием пробелов в наблюдениях). Оцифрованы и приведены в стандартный табличный вид сведения о расходах воды трех гидрологических постов, уровнях воды – семи постов.

Создана база метеорологических характеристик по данным наблюдений трех метеостанций бассейна р. Сухоны – Вологда, Тотьма, Великий Устюг. Источником информации послужили специализированные массивы ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центра данных». Данные приведены в стандартный табличный вид, удобный для дальнейшего анализа и обработки.

По результатам работы выполнены расчеты по основным методам прогнозирования стока равнинных рек.

Построены прогнозные модели, позволяющие вычислить расход воды весеннего половодья р. Сухона в замыкающем створе – д. Каликино. В процессе исследования подобраны предикторы, дающие наиболее тесную связь при построении прогнозной модели – максимальные расходы воды весеннего половодья г/п р. Сухона – г. Тотьма (со сдвижкой 1 сутки), средние суточные осадки и средняя температура воздуха по м/ст Тотьма.

Исследована возможность применения универсальной формулы методом нелинейной тенденции для р. Сухоны. Выполнен подбор параметра m (показатель, учитывающий форму кривой спада). Анализ полученных результатов показал применимость формулы, при увеличении значения $t_{\text{спада}}$ и корректировке параметра m (до значений 0.8-1.25).

Список использованных источников

- 1 Ресурсы поверхностных вод СССР том 3 Северный край – Л: Гидрометеоздат, 1972. – 661 с.
- 2 Свод Правил 33–101–2003 «Определение основных расчётных гидрологических характеристик» – М: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. – 73 с.
- 3 Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации – СПб: РГГМУ, 2007. – 278 с.
- 4 Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши Том 1 Выпуск 8 – Л: Гидрометеоздат, 1986. – 395 с.
- 5 Состояние поверхностных вод // АИС ГМВО. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 15.03.2021)
- 6 ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центра данных» // – URL: <https://meteo.ru> (дата обращения: 15.03.2021)
- 7 Сидоренко А. В. Гидрогеология СССР Том XLIV Архангельская и Вологодская области – М: Недра, 1969. – 300 с.
- 8 Антипов Н. П. Климат Вологодской области // – URL: <https://35pogoda.ru/klimat-vologodskoj-oblasti> (дата обращения: 15.06.2021)
- 9 Труфанов А. И., Новосёлов А. С. Геология, инженерная геология и гидрогеология: методические указания к проведению учебной практики / – Вол: ВоГТУ, 2010. – 32 с.
- 10 Почвенный покров Вологодской области. // HintFox – URL: <http://www.hintfox.com/article/pochvennij-pokrov-vologodskoj-oblasti.html> (дата обращения: 15.06.2021)
- 11 Филенко Р. А. Воды Вологодской области / Л: Ленинградский Ордена Ленина Государственный Университет имени А. А. Жданова, 1966. – 129 с.

- 12 Кичигин А. Н. Геоморфологическое районирование Вологодской области // Геология и география Вологодской области. / Вол: Русь, 2007. – с. 65 – 87.
- 13 Воробьев Г. А. Реальность и образ ландшафта // Геология и география Вологодской области. / Вол: Русь, 2007. – с. 6 – 14.
- 14 Попов Е. Г. Гидрологические прогнозы / Е. Г. Попов. – Л: Гидрометеиздат, 1979. – 129 с.
- 15 Георгиевский Ю. М. Гидрологические прогнозы / Ю.М. Георгиевский, С.В. Шаночкин. – СПб: Изд. РГГМУ, 2007. – 177 с.
- 16 Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Девятов В. С. Фоновое прогнозирование процесса формирования суточных вероятностных стоковых характеристик // «Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета», № 18, 2011. – С. 10–20.
- 17 Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Викторова Н. В., Громова М. Н., Шевнина Е. В. Методика фонового краткосрочного прогнозирования изменения водности // «Метеорология и гидрология», № 10, 2012.– С. 65–70.

Приложение А

Математические модели формирования расходов воды 1992-1995 гг.

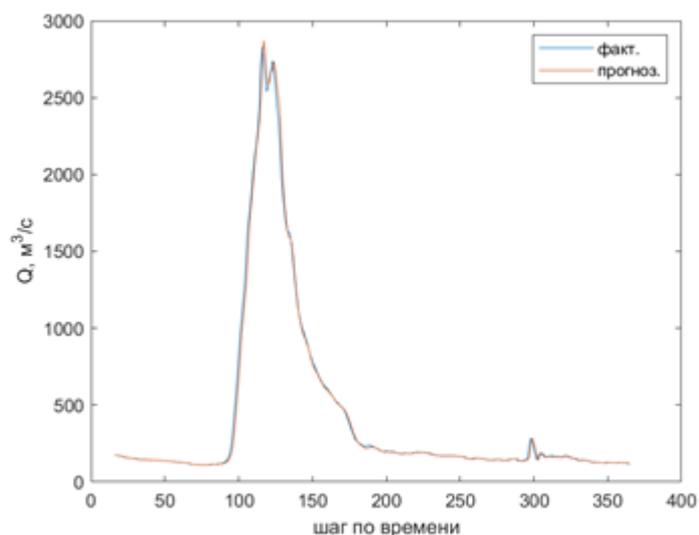
1 порядок

1992 $Kr =$

0.8855

$P =$

84.3836



Приложение А.1 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды первого порядка за 1992 г.

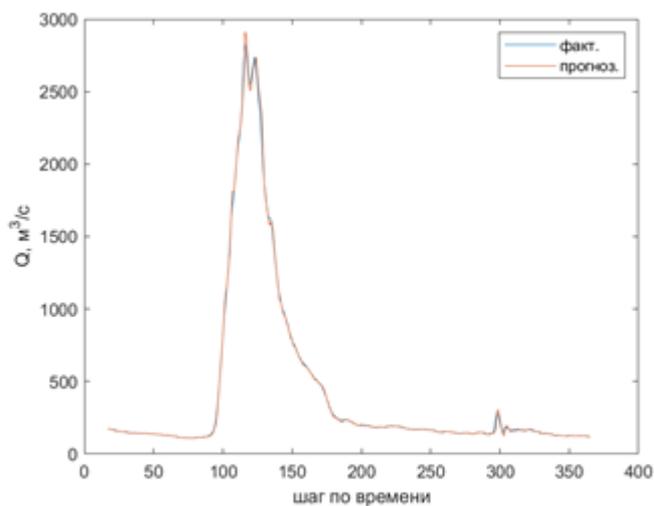
2 порядок

1992 $Kr =$

0.4441

$P =$

89.589



Приложение А.2 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды второго порядка за 1992 г.

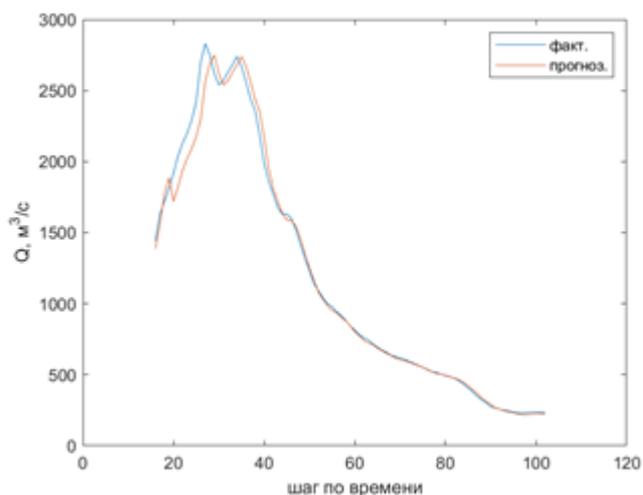
1 порядок со снегом

1992 Kr =

0.9745

P =

63.7255



Приложение А.3 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов водыв период снеготаяния за 1992 г.

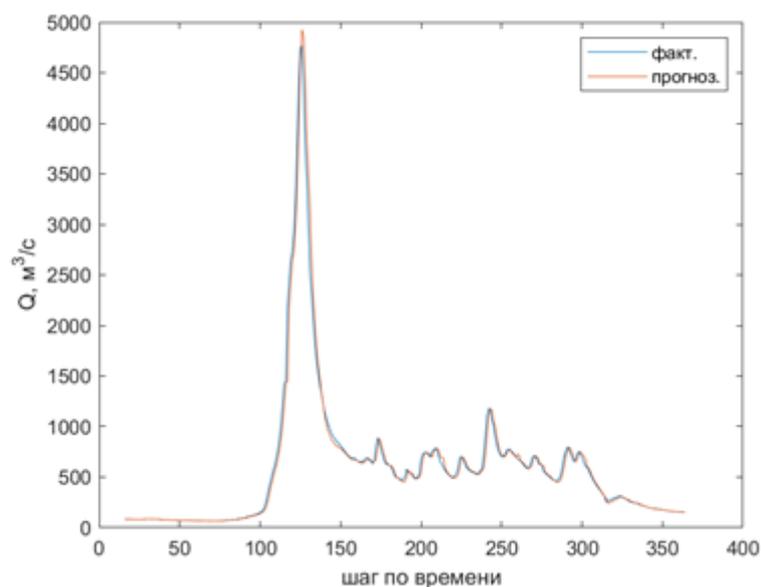
1 порядок

1993 Kr =

0.9947

P =

81.8681



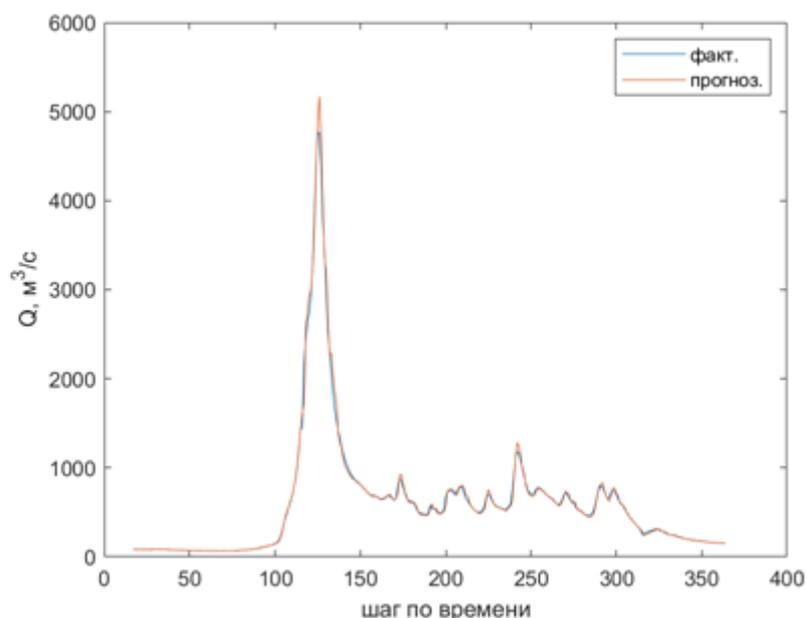
Приложение А.4 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод первого порядка за 1993 г.

2 порядок
1993 Kr =

0.5609

P =

88.7363



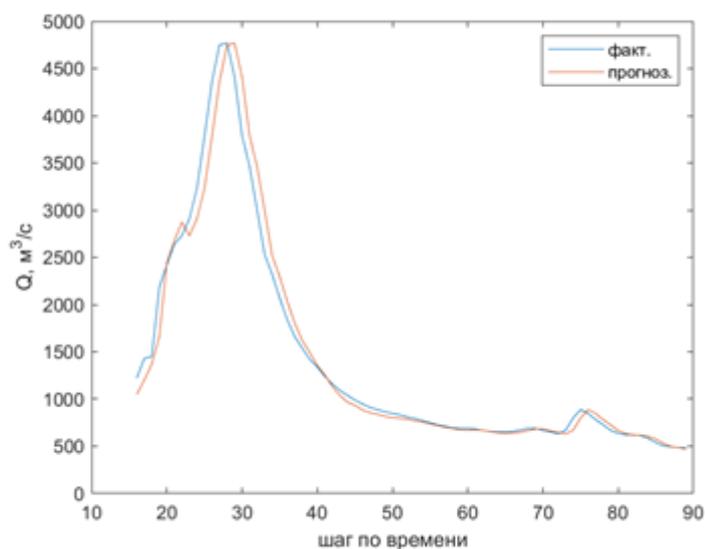
Приложение А.5 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод второго порядка за 1993 г.

1 порядок со снегом
1993 Kr =

0.935

P =

61.7978



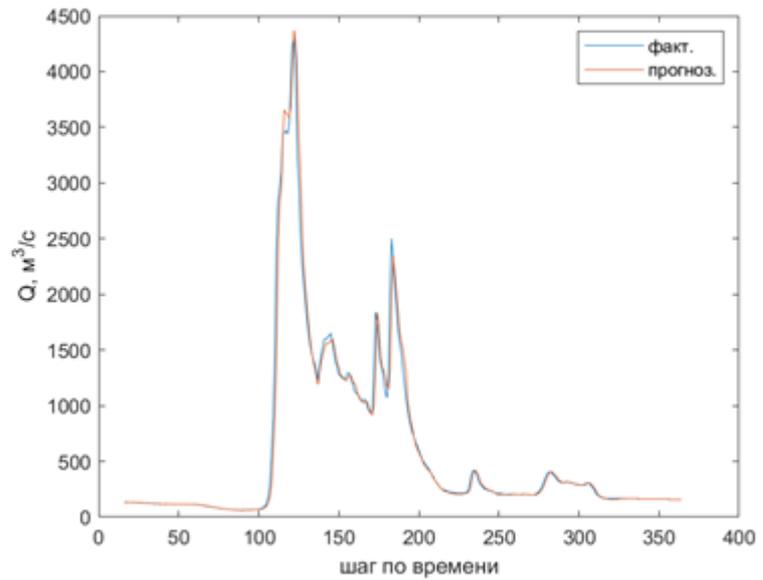
Приложение А.6 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды в период снеготаяния за 1993 г.

1 порядок
1994 Kr =

0.9532

P =

84.6154



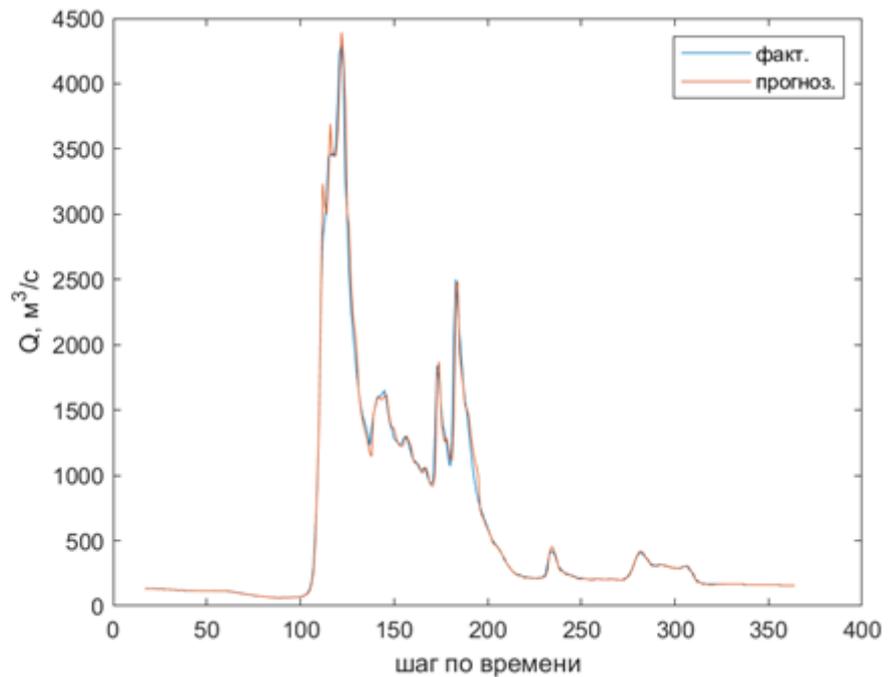
Приложение А.7 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод первого порядка за 1994 г.

2 порядок
1994 Kr =

0.602

P =

86.8132



Приложение А.8 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод второго порядка за 1994 г.

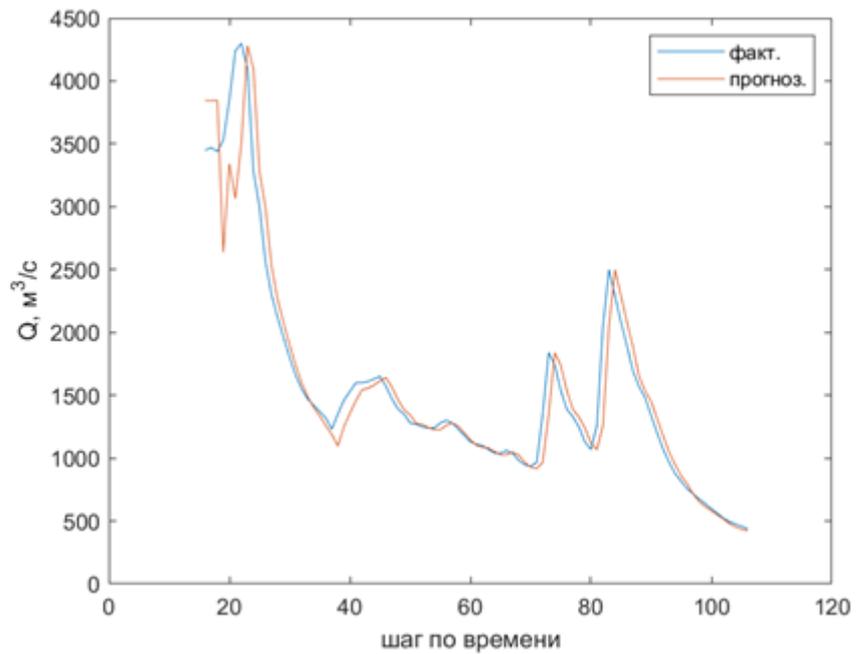
1 порядок со снегом

1994 $Kr =$

1.2559

$P =$

59.434



Приложение А.9 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды в период снеготаяния за 1994 г.

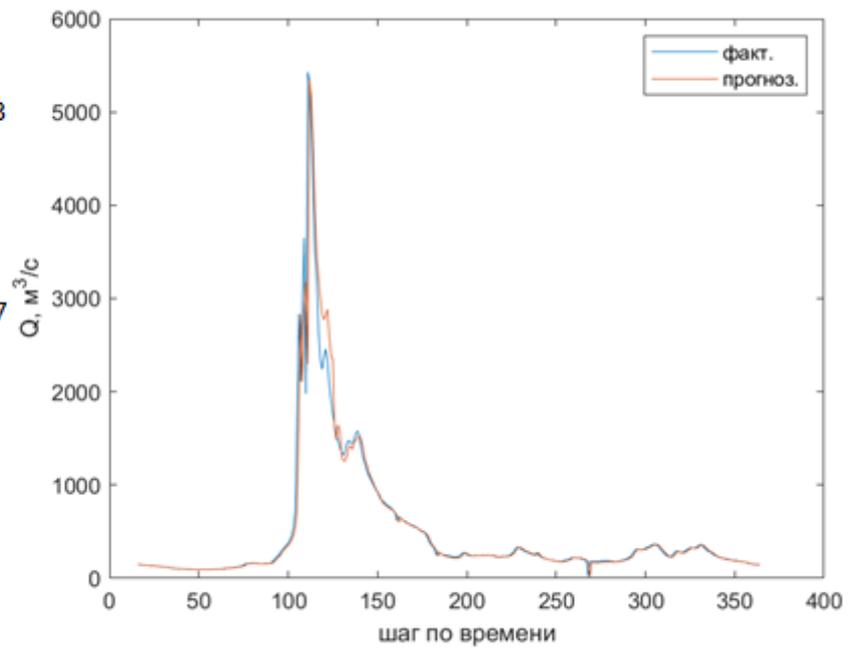
1 порядок

1995 $Kr =$

0.9503

$P =$

89.2857



Приложение А.10 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод первого порядка за 1995 г.

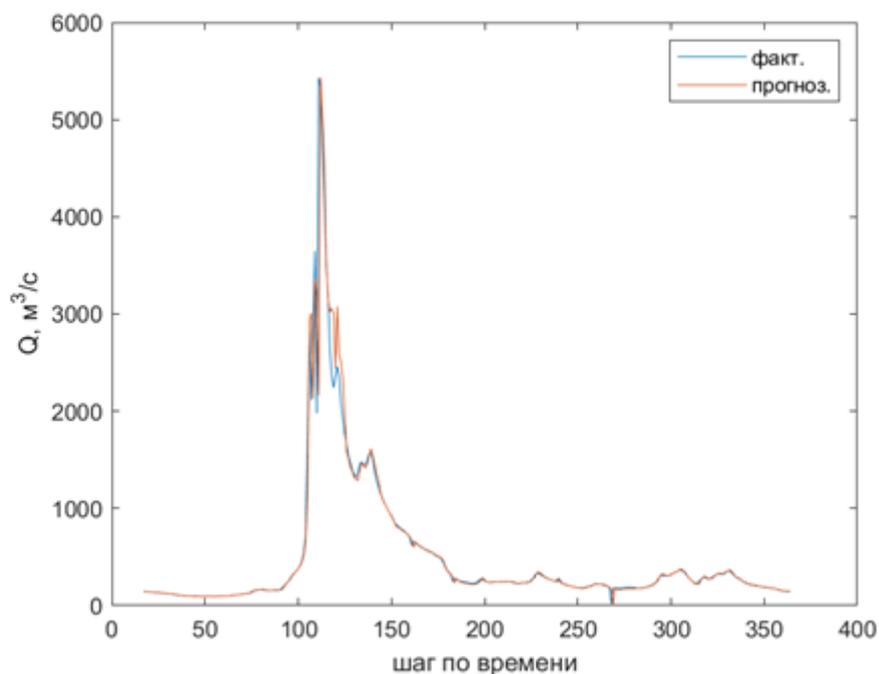
2 порядок

1995 Kr =

0.8898

P =

91.2088



Приложение А.11 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов вод второго порядка за 1995 г.

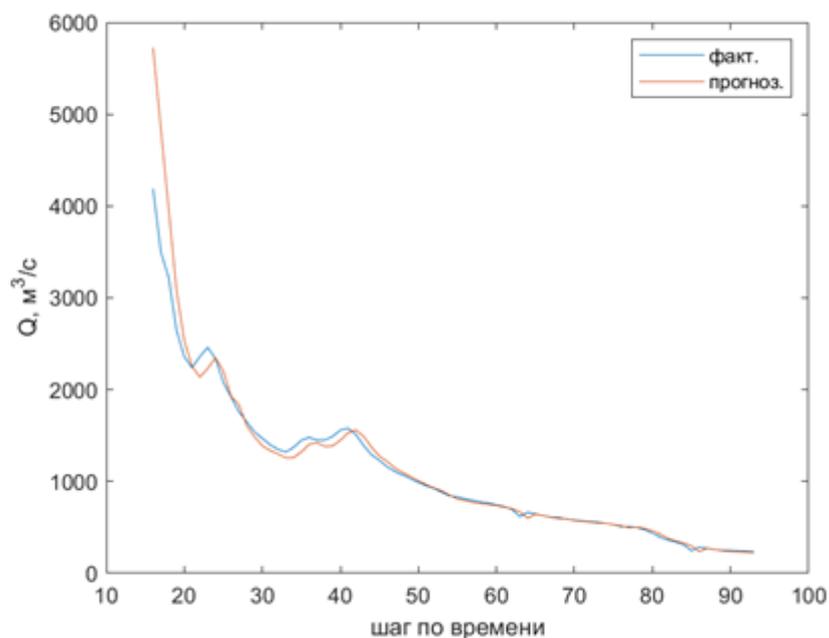
1 порядок со снегом

1995 Kr =

0.7013

P =

78.4946



Приложение А.12 – Совмещенные графики фактических и спрогнозированных расходов воды в период снеготаяния за 1995 г.