МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Методы учета стока при ледовых явлениях**

Исполнитель Панкова Яна Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Векшина Татьяна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.г.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«5» июня 2023 г.

Санкт–Петербург
2023

Содержание

Введение 3
1 Физико–географическое описание 5
1.1 Географическое положение и общее описание 5
1.2 Рельеф (с элементами ландшафтных характеристик) 8
1.3 Геологическое строение 13
1.4 Растительный и почвенный покров 14
1.5 Климатические характеристики 16
1.5.1 Температура воздуха 17
1.5.2 Атмосферные осадки 17
1.5.3 Снежный покров 18
1.6 Влияние климатических и антропогенных факторов на гидрологический режим рек 18
1.7 Описание гидрологических постов 20
2 Методы учета стока при ледовых явлениях 24
2.1 Построение хронологического графика зимних переходных коэффициентов 25
2.2 Метод, основанный на применении параметра Великанова 27
2.3 Регрессионно-гидравлическая модель 28
3 Анализ результатов расчетов 30
Заключение 49
Список использованных источников 50

Введение

Сток воды – количество воды, стекающее с данного участка суши за некоторый период времени. «Измерение расходов воды является трудоемкой работой, поэтому производятся они эпизодически. Задачей учета стока является воспроизведение гидрографа как непрерывной функции времени по результатам дискретных измерений расходов воды и непрерывных наблюдений за уровнями воды» [1].

Учет стока может осуществляться как для определения водных ресурсов и изучениях гидрологического режима рек (режимный учет), так и для текущего контроля и прогноза водности рек при гидролого-прогностическом обслуживании (оперативный учет стока). Оба случая предполагают вычисления на основе гидрометрических данных об уровнях и расходах воды, различия состоят в использовании различных методов.

Одним из важнейших условий эффективного использования водных ресурсов является повышение точности учета стока. Наибольшие сложности при расчетах ежедневных расходов воды возникают в переходные периоды, когда измерения расходов воды практически не производят по техническим причинам.

Большинство станций гидрологической сети снабжено цифровым оборудованием и способно использовать методы учета стока, которые требуют проведения большого объема вычислений, тем самым открывая перспективу повышенной точности учета стока, в следствии внедрения современных методик и технологий, которые были основаны на методах конца прошлого века.

Целью данной работы является учет стока за период ледостава с использованием методов:

- переходных коэффициентов;
- метода, основанного на применении параметра Великанова;
- регрессионо-гидралической модели.

В качестве объектов исследования были подобраны реки, достаточно оснащенные данными измеренных расходов воды.

В качестве эталонных принимались ежедневные расходы воды, приведенные в гидрологическом ежегоднике ($Q_{\text{ге}}$) [26].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Выявить особенности учета стока в период ледостава;
- Оценить эффективность применения рассматриваемых методов;
- Выполнить оценку методов с точки зрения их универсальности и пригодности для использования при разработке компьютерной технологии учета стока.

1 Физико–географическое описание

1.1 Географическое положение и общее описание

Бурен – река в республике Тыва (рис. 1.1), впадает в Малый Енисей. Площадь водосбора реки – 5980 км^2. По характеру относится к рекам со смешанным типом питания с преобладанием снегового от весеннего снеготаяния и дождевого в летнее время.

Рисунок 1.1 – Река Бурен

Араданка – река в Ермаковском районе Красноярского края (приток реки Арадан), с истоком на северных склонах Араданского хребта (рис. 1.2). Длина водотока – 14 км, площадь водосбора – 217 км^2.

Рисунок 1.2 – река Араданка

Джабаш – река в Хакасии (рис. 1.3), правый приток Абакана [30].

Протяжённость русла – 84 км, площадь водосбора – 2360 км². Специфически сложившаяся таёжная река с многочисленными отмелями и плёсами.

Рисунок 1.3 – Река Джабаш

Крупных населённых пунктов на берегах нет. Влияние человека на окружающую среду здесь минимально, кроме последствий, оставленных лесозаготовителями, которые длительное время сплавляли по реке древесину.

После запрещения сплава река начала обретать свои естественные формы. В Джабаше водятся все характерные для бассейна Абакана виды речных рыб.

Мана – река в Красноярском крае, правый приток Енисея (рис. 1.4). Длина реки составляет 475 км, площадь бассейна – 9 260 км^2, скорость речного потока изменяется от 4 км/час (в низовьях) до 7—8 км/час в верховьях. Относится к Енисейскому бассейновому округу. Берет начало в северо-западной части Восточного Саяна, вытекает из горного озера Манского, расположенного на высоте 1 400 м над уровнем моря.

Рисунок 1.4 – Река Мана

Мана течет в основном в северо-западном направлении через таежные зоны Партизанского, Манского, Березовского районов Красноярского края. Впадает в Енисей в 30 км выше по течению от Красноярска. Имеет более 300 притоков различной величины.

«В верховьях питание реки снеговое и дождевое, но в отличие от других енисейских рек бассейн Маны обладает особыми природными условиями — наличием больших площадей легкорастворимых горных пород (так называемых карстовых), более значительным подземным питанием и более равномерным распределением стока в течение года» [32]. Значительная часть

поверхностного стока переходит в подземный, выходит на свет кристально чистой, холодной (не выше 8—10 °С) гидрокарбонатной минеральной водой многочисленных родников, пригодной для питья.

В русле Маны большое количество островов (рис. 1.5), крутых поворотов с прижимами, подводных, а в малую воду надводных камней, перекатов, мелей.

Рисунок 1.5 – Пример наличия островов на реке Мана

Видовой состав животного и растительного мира верховьев Маны соответствует характеристикам Восточного и Западного Саяна.

1.2 Рельеф (с элементами ландшафтных характеристик)

Обширные пространства изучаемой территории характеризуются весьма сложным рельефом, отличающимся большим разнообразием своих форм.

Изучаемые реки расположены в районе Алтайско-Саянского нагорья, которое охватывает восточную часть Алтая, Западный Саян, значительную часть Восточного Саяна и Тувинские горы.

Географическое положение данного района вдали от морей и океанов, и на границе между сибирским и центральноазиатским ландшафтными областями, что обуславливает большое разнообразие природных условий отдельных его частей, в том числе и рельефа.

Река Джебаш находится в районе гор Кузнецкий Алатау. Они представляют собой группу горных массивов и неглубоких впадин между ними. Наиболее высокие вершины поднимаются до отметок 2000 м и находятся в южной части, к северу горы понижаются и переходят в низкогорье. В высокогорной области хорошо сохранились следы ледниковой деятельности. Реки, стекающие с гор, имеют узкие долины и отличаются стремительным течением. Между высотными отметками 500—750 м располагается лесостепной пояс; выше он сменяется зоной лиственничных лесов, верхняя граница распространения которых местами поднимается до 900 м. Выше (до 1300 м) находится пояс темнохвойных лесов, а над ним высокогорная зона с субальпийскими и альпийскими лугами и высокогорной тундры по каменистым и щебнистым гольцовым вершинам и гребням.

Река Араданка расположена в районе Минусинской котловины (степная и лесостепная межгорная впадина) – представляет собой наиболее освоенную часть, отличающуюся благоприятными для земледелия природными условиями; поэтому данная котловина является одним из самых важных сельскохозяйственных районов в Красноярском крае. Котловина имеет тектоническое происхождение. В ее строении хорошо выражены две структурных ступени или яруса. Верхний ярус образуют невысокие (до 600—800 м) хребты и кряжи (Батеневский, Солгонский, Косинский и др.), которые разделяют между собой второстепенные котловины Чулымо-Енисейскую и Сыдо-Ербинскую от Минусинской впадины. Днища этих котловин постепенно понижаются в высотном отношении от 300 м на юге и до 150 м на севере.

Минусинская котловина в средней части прорезается в меридиональном направлении долиной Енисея; здесь, в приенисейской части, находится

наиболее низкий участок котловины (240—250 м). На правобережной стороне дно котловины представлено всхолмленной равниной, сложенной толщей рыхлых отложений; местами поднимаются невысокие (500—700 м) холмы с пологими склонами и такими же рыхлыми грунтами. Другим характерным элементом рельефа являются массивы бугристо-грядовых песчаников; относительная высота их колеблется от 5 до 20 м. Эти гряды ориентированы преимущественно в широтном направлении. Для левобережной части впадины характерно преобладание низкогорного рельефа; здесь встречаются бессточные впадины и участки с куэстовыми формами рельефа.

Реки преимущественно имеют плоскодонные долины. Речная сеть Минусинской котловины относится к бассейну Енисея. В пределах засушливой ее части многие малые реки летом сильно мелеют, некоторые пересыхают, не донося своих вод до главных рек.

В пределах Минусинской котловины хорошо выделяются два высотно-ландшафтных пояса – степной и лесостепной. Степи занимают наиболее пониженную и засушливую часть впадины до высоты примерно 500 м. Растительность характеризуется разнообразием и сложным ее распределением. Обширные участки лесостепи распаханы.

Ергаки – природный парк краевого значения, расположенный на юге Красноярского края. Представляет собой массив разнонаправленных грив, отрогов, в значительной степени обработанных ледником (рис. 1.6). Горный рельеф в центральной части парка на периферии сменяется гольцовым с отдельно расположенными горами и отрогами более плавных очертаний с пенепленом на вершинах.

Рисунок 1.6 – Природный парк «Ергаки»

Реки Бурен и Мана расположены на территории Восточного Саяна, или Восточно-Саянского нагорья (лесные и гольцовые горы), представляющего собой обширную горную систему, простирающуюся с северо-запада на юго-восток от истоков рек Кача и Кемчуг (левобережье Енисея) до р. Иркута (Тункинского грабена) более чем на 1000 км.

Рельеф Восточного Саяна очень сложный; здесь имеются высокие хребты, плоскогорья, межгорные понижения, глубокие долины, участки, подвергавшиеся в прошлом воздействию ледников, о чем свидетельствуют кары, цирки, троговые долины. Северо-западная часть системы представлена низкогорьем, где высотные отметки не превышают 800—1000 м. К юго-востоку высота гор увеличивается, они расчленяются на плосковершинные хребты, называемые «белогорьями»; известны Манское, Канское, Койское, Идарское с высотами 1500—1800 м. Белогорья окаймлены полосой сильно расчлененных эрозионных низких гор. На гребнях и склонах хребтов видны следы деятельности ледников. Северо-западным отрогом Восточного Саяна является Красноярский хребет (450—850 м), где по правобережью Енисея расположен заповедник Столбы (47 тыс. га), известный многочисленными,

грандиозных размеров, выветренными скалами причудливой формы, которые в совокупности называются столбами.

«Красноярские Столбы» — национальный парк в Красноярском крае (рис. 1.7) на северо-западных отрогах Восточного Саяна, граничащих со Среднесибирским плоскогорьем.

Из-за мощных тектонических процессов, происходящих в земной коре, стали появляться разломы, в толще мягких осадочных пород образовались пустоты, которые заполнила сиенитовая магма. Она так и не смогла прорваться на поверхность Земли, и будто в наказание самой себе, застыла в недрах. Примерно 2 миллиона лет назад, началось сводообразное поднятие великого Восточного Саяна, а вместе с ним и остывшей магмы, интрузии.

Рисунок 1.7 – Национальный парк «Красноярские столбы»

Большая часть территории Восточного Саяна покрыта горно-таежными хвойными и светлохвойными лесами. По долинам рек растут лиственничные леса. В высокогорном поясе развиты альпийские луга, значительные по площади участки заняты горной тундрой.

1.3 Геологическое строение

Существенное влияние на формирование стока и распределение его по времени и по территории оказывает геологическое строение речных водосборов. Изучаемая территория имеет весьма сложное геологическое строение. Здесь широкое развитие получили разновозрастные геолого-структурные комплексы, отличающиеся между собой в морфологическом отношении и по своему литологическому составу, а также по степени тектонической нарушенности и положению относительно базиса эрозии.

Реки расположены на Сибирской платформе. В строении верхнего структурного яруса, где в основном формируется поверхностный сток бассейна, принимают участие главным образом триасовые образования. Далее на север прослеживаются в виде узкой полосы ордовикские и силурийские отложения, состоящие из доломитов, известняков, песчаников и сланцев.

Четвертичные отложения распространены почти повсеместно и образуют сплошной или разорванный чехол, состоящий из элювиальных, делювиальных и аллювиальных пород.

На юге Сибирской платформы располагается Рыбинская впадина, сложенная маломощными вулканогенными и пестроцветными терригенными отложениями девона и карбона и пологозалегающими юрскими отложениями, венчающими верхний структурный комплекс пород.

Саяно-Алтайская горно-скульптурная область состоит из сложнодислоцированных образований. Горные сооружения сложены преимущественно древними кристаллическими и метаморфическими породами, в значительной степени выветрившимися с поверхности и хорошо промытыми до уровня вреза речной сети. Из четвертичных отложений в Саяно-Алтайской области развиты аллювиальные и пролювиально-делювиально-элювиальные отложения предгорных равнин и погребенных речных долин. В межгорных котловинах этой области, в днищах широких долин залегают пески с галькой и глиной в виде слоя мощностью до 30 м.

В межгорном Минусинском прогибе в основании разреза залегают вулканогенные породы нижнего девона, перекрытые осадочными отложениями девона, карбона, перми и юры; в их составе превалируют песчаники, аргиллиты, алевролиты, вулканогенные образования представлены диабазовыми и лабрадоровыми порфиритами, базальтами, туфами, которые чаще всего выходят на поверхность по периферии прогиба.

В отдельных районах изучаемой территории развиты карстовые процессы, связанные с растворением водой карбонатных и соленосных пород, также термокарстовые явления.

В горных районах Кузнецкого Алатау карстовые процессы связаны с растворением водой карбонатных пород (известняки и доломиты). Карстованию подвергаются отложения верхнего протерозоя и кембрия, залегающие на глубине до 250 м от поверхности. В их толще образовались полости в виде галерей, шахт, туннелей и т. д.

В бассейне Маны имеются до 40 мелких пещер и воронок, наиболее развитых на водоразделах. Глубина их колеблется от 20 до 160 м.

В Минусинском межгорном прогибе следы карстовой деятельности обозначены на местности в виде небольших и неглубоких впадин.

В районе Сибирской платформы встречаются следы соляного карста, которые наиболее отчетливо выражены в местах выхода соленых источников.

1.4 Растительный и почвенный покров

Почвы в пределах изучаемой территории столь же разнообразны, как и условия их формирования. На процесс почвообразования, как и на эволюцию растительного покрова, большое влияние оказывают многие факторы, в том числе континентальность климата, экспозиции склонов гор и их крутизна и многое другое.

Изучаемые реки расположены в лесостепной зоне, представленной разобщенными массивами Красноярской и Канской лесостепи.

Преобладающими являются суглинистые и глинистые делювиального и эдювиально-делювиального происхождения почвообразующие породы, а по долинам рек распространены суглино-супесчаные аллювиальные отложения. Главное значение здесь имеют серые лесные длительномерзлотные глееватые черноземы. Серые лесные почвы развиваются в условиях большого влияния длительного сезонно-мерзлотного горизонта. Механический состав их обычно суглинистый и тяжелосуглинистый, иловато-пылеватый. Структура – комковато-зернистая, что обуславливает их хорошие водно-физические свойства.

В пределах рассматриваемой территории растительный покров представлен в широком зональном аспекте, а в горных областях он характеризуется и вертикальной поясностью.

В Красноярской лесостепи только в отдельных местах сохранились дернисто-луговые формации с дерновинными злаками и разнотравьем, которые на южных крутых склонах гор сменяются остепненной растительностью. Поверхность этого района в большей части распахана и занята посевами зерновых культур.

В зоне подтайги и островных лесостепей по правобережью Енисея, окаймляющей с севера Канскую лесостепь, распространены сосново-березовые или березовые леса, вытеснившие здесь лиственнично-сосновые и сосновые парковые травянистые леса; в местах где наиболее интенсивно проявляется хозяйственная деятельность человека, развиты лесные луга, залежные сенокосы и пашни. Среди лугово-степной растительности встречаются небольшие массивы сосново-березовых перелесков с примесью деревьев лиственницы. Значительная часть Канской лесостепи представлена «бугристой степью», на поверхности которой плоские возвышения заняты степняками, а понижения – полынно-ковыльно-кустарничковой растительностью.

Южная подзона тайги характеризуется развитием травянистых типов темнохвойных лесов с преобладанием пихты. С продвижением к западной

границе бассейна в связи с усиливающейся увлажненностью травянистые леса уступают место лесам таежного типа. В них развивается почти сплошной, но не мощный моховой покров из зеленых мхов, сочетающихся с сфагновыми мхами. Многие массивы темнохвойных лесов, пораженные шелкопрядом после пожаров и вырубок, сменились осиново-березовыми. В долинах рек на песчаных террасах развиты типы травянистых сосновых боров.

Темнохвойные травянистые леса постепенно сменяются к югу смешанными лесами с преобладанием березы и осины, под пологом которых развивается подрост из темнохвойных пород.

Для Минусинской степи характерна растительность, представленная крупно-полынно-ковыльными вариантами. На северных склонах холмов встречаются мелкоствольные березовые колки с вейнико-разнотравным травостоем. В долине Енисея распространены сосновые леса с остепненным характером растительности.

В горных системах Кузнецкого Алата, Западного и Восточного Саяна, полуколькотравные субальпийские и низкотравные альпийские луга. Горные моховые тундры венчают хребты в зоне границы со снеговой линией. Особенно значительные участки, занятые высокогорной тундрой, встречаются в Восточном Саяне. В верховьях Маны склоны горных хребтов с каменистыми россыпями покрыты лишайниками.

1.5 Климатические характеристики

Климат района отличается резко выраженной континентальностью. Наблюдаются довольно суровые зимы, а летние месяцы непродолжительны. Суточная амплитуда колебаний температуры воздуха достигает 10—20 °С.

Перенос воздушных масс обычно осуществляется в направлении с запада на восток, однако временами наблюдаются выходы циклонов с юга или юго-запада, обуславливающие обильные осадки.

1.5.1 Температура воздуха

Многолетняя средняя годовая температура воздуха составляет 0,1—0,5 °С. Зима холодная, длится 6—7 месяцев, наблюдается инверсия температур.

В наиболее холодном месяце (январе) средняя месячная температура воздуха меняется в зависимости от высоты водосборов и характера рельефа от –36 до –15 °С. Суровость зимы обуславливается преобладанием антициклонального режима погоды с частыми затишьями и морозами.

Наиболее теплым месяцем является июль, средняя температура воздуха составляет 14—18 °С.

Для характеристики процессов весеннего снеготаяния и условий формирования водного режима большое значение имеют сроки перехода средней суточной температуры воздуха через –5, 0 и 5°С.

Устойчивый переход средней суточной температуры через –5°С происходит в третьей декаде марте. Переход температуры воздуха через 0°С, определяющий наступление весны, происходит в конце марта – начале апреля.

В годовом ходе температур особенно быстрое нарастание (на 10—12°С) их отмечается в период от марта к апрелю. Наряду с частыми заморозками весной наблюдается очень интенсивное повышение температуры в дневные часы суток. При ясной погоде весной суточная амплитуда колебаний температуры воздуха изменяется в среднем до 10°С.

Переход средней суточной температуры через 5°С осуществляется примерно через 10 суток после наступления положительной температуры.

Наступление зимы, связанное с устойчивым переходом температур через –5°С приурочено к середине – концу октября.

1.5.2 Атмосферные осадки

Наибольшее количество осадков выпадает в июле, средняя многолетняя величина их изменяется от 50 до 200 мм.

Наименьшее количество влаги выпадает зимой – в январе – феврале, когда формируется антициклон.

Холодный период охватывает время с ноября по март, а теплый – с апреля по октябрь. В теплое время года осадков выпадает больше, чем в холодный период. Жидких осадков выпадает больше (60—70 %), чем твердых и смешанных. Годовое количество осадков составляет 1000—1500 мм.

1.5.3 Снежный покров

Общее количество осадков, выпадающих в виде снега составляет 30—40 % от годовой суммы осадков. Устойчивый снежный покров образуется в течение октября.

Продолжительность залегания устойчивого покрова составляет более 200 дней. Устойчивый снежный покров начинает разрушатся после наступления дневных положительных температур. Средняя интенсивность таяния снега составляет 3—5 мм/сутки.

1.6 Влияние климатических и антропогенных факторов на гидрологический режим рек

В настоящее время направление гидрологических исследований, освещающих те или иные аспекты влияния климатических факторов на сток рек, меняется в связи с увеличением антропогенного пресса на речные системы.

Гидрологический режим водотоков с отрицательным трендом годового стока определяется общим характером увлажнения территории, которое перекрывает влияние всех других факторов. Положительный тренд годового стока при общей тенденции снижения осадков обусловлен уменьшением испарения на водосборе, которое зависит как от температурного режима района исследований, так и от антропогенной трансформации лесной растительности под влиянием рубок. Несмотря на значительную

вариабельность стока по годам, тренды стока исследуемых рек изменяются незначительно, что указывает на относительную стабильность водности рек. Это связано с кумулятивным эффектом антропогенной трансформации лесной растительности на водосборах, т. е. с новыми вырубками, зарастанием старых и созданием лесных культур. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на региональном уровне в условиях антропогенного пресса на леса водосборных бассейнов средних и малых водотоков влияние изменения климата в формировании стока рек менее выражено, чем рубок главного пользования.

Существенная нарушенность лесного покрова связана с промышленным освоением лесов с середины 50-х гг. XX в. Вырубались наиболее доступные массивы на северном макросклоне Западного Саяна, в бассейне р. Мана, в ее среднем и нижнем течении. Более 40 % от общей площади бассейна р. Кебеж и около 35 % от общей площади бассейна р. Тайгиш (приток Шадата) составляют производные леса, что отражает степень нарушенности коренных лесов в этих бассейнах. Наибольшей нарушенностью характеризуются леса черневого пояса, где более 65 % площади занимают леса послерубочного происхождения. В горно-таежном поясе на долю производных лесов приходится 15–17 %. К концу 60-х гг. XX в. наиболее доступные кедровые леса в черневом поясе Западного Саяна были почти полностью вырублены.

Тенденции изменения гидрологического режима исследуемой территории зависят не только от климатических изменений, но и в значительной степени определяются лесохозяйственной деятельностью на речных водосборах. Рубки леса и характер последующих лесовосстановительных сукцессий в значительной степени влияют на изменение структуры водного баланса. Сопоставление динамики площадей, нарушенных рубками коренных лесов, в бассейнах рек Мана, Кебеж и Шадат с трендами стока этих рек показывает, что антропогенная трансформация лесной растительности под влиянием рубок «работает» на снижение испарения на водосборе и увеличение стока. Несмотря на значительную

вариабельность стока по годам, тренды коэффициента стока этих рек изменяются незначительно, что указывает на относительную стабильность водности рек.

1.7 Описание гидрологических постов

Схема расположения гидрологических постов приведена на рис. 1.8.

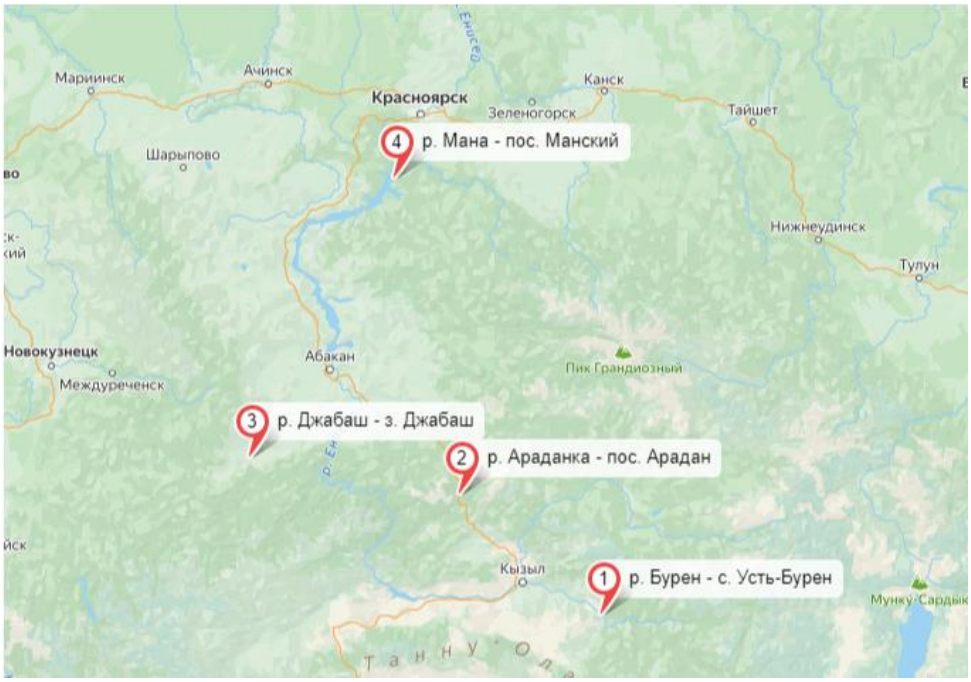


Рисунок 1.8 – Схема расположения гидрологических постов на географической карте

Река Бурен – с. Усть-Бурен. Пост расположен в 3 км от устья реки. Местность горная рассечена долинами ручьев и логами. Долина реки шириной до 0,8 км. Левобережный склон порос степной растительностью, правобережный – густым смешанным лесом. Дно долины террасировано, поросло смешанным лесом, кустарником и степной растительностью.

Русло реки шириной 40—50 м слабоизвилистое, каменисто-галечное, слабодеформирующееся. Левый берег крутой, местами обрывистый, скалистый, правый – пологий высотой 2 м, поросший густым смешанным лесом. В 30 м ниже водпоста у левого берега начинается остров.

Водпост свайный находится на левом берегу, оборудован самописцем уровня воды типа «Валдай».

Высота нуля графика 718,88 м БС.

Гидроствор 1 расположен в 8 м ниже водпоста, оборудован гидрометрической люлькой.

Гидроствор 2 расположен в 85 м выше водпоста, 3 – 270 м выше водпоста, служит для иземерения расходов воды в зимний период.

Уклонные посты расположены в 45 м выше и 20 м ниже основного водпоста.

Температура воды измеряется в створе водпоста у берега, толщина льда – на середине реки.

Река Араданка – пос. Арадан. Пост расположен в 2 км от устья. Рельеф окружающей местности горный. Склоны гор крутые, местами отвесные, расчлененные падями. Долина реки прямая, закрытая, шириной по дну 500—600 м. Склоны долины крутые, поросшие хвойным лесом. Дно долины прямое, заросшее лесом с густым подлеском и кустарником.

Русло реки на участке поста прямолинейное, валунно-галечное, деформирующееся. Берега крутые высотой 1,5—2,0 м, каменистые, поросшие лесом и кустарником.

Водпост свайный находится на левом берегу, оборудован самописцем уровня воды типа «Валдай».

Высота нуля графика 876,00 м БС.

Гидроствор 1 совпадает со створом водпоста, оборудован подвесным гидрометрическим мостиком.

Температура воды измеряется в створе водпоста у берега, толщина льда – на середине реки.

Река Джебаш – з. Джебаш. Пост расположен в 0,6 км от заимки, в 4 км от устья.

Река протекает по пересеченной горно-таежной местности. Ширина долины 0,6—0,8 км. Склоны крутые, рассечены логами, поросли смешанным лесом.

Пойма правобережная шириной 400—450 м, поросла кустарником и луговой растительностью; затопляется при уровне воды 300 см.

Русло реки прямолинейное, неразветвленное, сложено галечно-песчаными наносами, слабодеформирующееся. Левый берег крутой высотой 25—30 м, правый – представлен аллювиальной террасой высотой 1,5—2,5 м, размываемый. В 160 м выше и 170 м ниже водпоста расположены острова.

В период весеннего ледохода в 200 м ниже водпоста бывают заторы льда.

Водпост свайный находится на левом берегу.

Высота нуля графика 439,29 м БС.

Гидроствор 1 совпадает со створом водпоста, оборудован дистанционной гидрометрической установкой ГР-70, ездовым и разметочным тросами и лодкой.

Уклонные посты оборудованы в 50 м выше и 100 м ниже основного поста.

Температура воды измеряется около водпоста у берега, толщина льда – на середине реки.

Река Мана –пос. Манский. Пост расположен в верхней части поселка, в 12 км от устья.

Прилегающая местность крупнохолмистая, поросшая смешанным лесом с преобладанием хвойных пород. Долина реки шириной 1,5 км. Левый склон долины крутой высотой 150 м, правый – пологий. Склоны рассечены глубокими оврагами и логами.

Русло реки прямолинейное, устойчивое. Левый берег обрывистый, правый – пологий высотой 5—6 м. Дно реки сложено из крупной гальки и камня. Ледостав устанавливается с полыньями и сильной зашугованностью русла.

Водпост свайный находится на правом берегу.

Высота нуля графика 153,00 м БС.

Гидроствор 1 совпадает со створом водпоста, оборудован лодочной переправой по тросу.

Верхний уклонный пост расположен в 200 м выше водпоста, нижним – служит основной водпост.

Пробы на определение химического состава воды берутся в створе водпоста на середине реки.

Температура воды измеряется около водпоста в 2—5 м от берега, толщина льда – на середине реки.

2 Методы учета стока при ледовых явлениях

Зависимость между расходами и уровнями выражается графически кривой расходов, которая строится для определения стока воды. Стоком называется количество воды, протекшей через поперечное сечение водотока за определенное время. Основная расчетная характеристика гидрометрического учета стока – расход воды ставится в прямое соответствие к значению уровня воды. В большинстве случаев ежедневный расход воды ставится в соответствие среднему суточному значению уровня воды.

«Режимные характеристики стока вычисляют по истечении года, имея в распоряжении всю годовую совокупность измеренных расходов и уровней воды, дополненную сведениями о состоянии реки и ее русла в течение всего годового цикла. При режимном учете стока специалист-гидролог располагает сведениями о состоянии пропускной способности русла реки на моменты измерений расходов воды и должен воспроизвести эти характеристики в интервалах между измерениями, т. е. в ретроспективном варианте выполнить их интерполяцию» [1].

«В случае однозначного соответствия расходов Q и уровней H задача сводится к определению ежедневных расходов воды с использованием кривых расходов или её аналитической аппроксимации $Q(H)$.

При неоднозначности этой связи, обусловленной изменением пропускной способности русла под влиянием различных факторов приходится прибегать к различным методам интерполяции характеристик пропускной способности русла в интервале между измерениями расходов воды» [7].

Наличие ледовых явлений нарушает гидравлический режим реки, имевший место при свободном ее состоянии. «Ледяные образования, в частности ледяной покров, уменьшают площадь живого сечения, увеличивают гидравлические сопротивления. Движение льда в период ледохода, образование заторов, зажоров вызывают переменный подпор. Полыньи

способствуют образованию внутриводного льда и скоплениям его на участках реки ниже по течению» [11].

В этих условиях не удается получить достаточно устойчивую зависимость *Q=f(H)* и поэтому возникает необходимость в применении иных способов подсчета стока. Для вычисления стока воды наибольшее применение в этих случаях находит способ интерполяции между измеренными расходами воды и способ зимних переходных коэффициентов $K_{зим}$.

2.1 Построение хронологического графика зимних переходных коэффициентов

Переходный коэффициент $K_{\text{зим}}$ выражает степень нарушения связи между расходом и уровнем, свойственной свободному руслу, в результате суммарного влияния ледяных образований:

$$K_{\text{зим}} = \frac{Q_{\text{зим}}}{Q_{\text{св}}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{зим}}$ – расход воды при ледоставе, м^3/с;

$Q_{\text{св}}$ – расход воды, полученный при том же уровне с кривой расходов для свободного состояния русла при уровне, зафиксированном при измерении расхода воды, м^3/с.

Для каждого измеренного расхода при ледяном покрове $Q_{\text{зим}}$ определяют при том же уровне расход $Q_{\text{св}}$ по кривой $Q = f(H)$, затем по формуле (1) вычисляют $K_{\text{зим}}$.

Значение зимнего переходного коэффициента определяют для каждого измеренного при ледяном покрове расхода воды.

По полученным значениям $K_{\text{зим}}$ строят хронологический график. Для периода сплошного ледостава линия графика проводится как плавная кривая, проходящая непосредственно по точкам значений $K_{\text{зим}}$; при очень частых измерениях линию графика проводят осредненно.

Для построения хронологического графика используются схемы построения, разработанные Огиевским [20], предпринявшим попытку гидрометеорологического обоснования учета зимнего стока. Эти схемы построены на общих закономерностях в зависимости от температуры воздуха и гидрологических факторов.

«Расчет стока с помощью хронологического графика зимних переходных коэффициентов целесообразен в тех случаях, когда учет хода уровня может дать уточнение результатов вычислений, следовательно, когда колебания уровня отражают изменения расхода, и в то же время колебания расхода имеют разный знак или же происходят не плавно» [13].

Наиболее сложным случаем является использование переходных коэффициентов в переходные периоды. Так при построении $K_{зим}$ в осенне-зимний период следует учитывать:

а) ход температуры воздуха и осадков (по комплексному графику);

б) сведения о характере и количественном развитии ледяных образований

в) сведения о ледовой обстановке на нижележащем участке реки, особенно сведения о заторах;

г) ход уровня на других постах, расположенных на данной реке (по совмещенному графику);

д) материалы вычислений стока, сведения о ледовых явлениях и комплексные графики прошлых лет

При отсутствии видимой связи между расходом и уровнем, что имеет место при заторах и зажорах, использование зимних переходных коэффициентов недопустимо, так как может повлечь грубые ошибки.

Таким образом, как и в случае интерполяции расходов метод переходных коэффициентов строится на графических построениях (более сложных) и не имеет аналитического обоснования.

2.2 Метод, основанный на применении параметра Великанова

Гидравлическое сопротивление движению руслового потока в зимний период значительно меняется, особенно в период вскрытия. На постах гидрологической сети измеряются уровни *H*, расходы *Q*, толщина льда и температура воды *t*, но, как правило, не выполняются измерения уклонов *I* и тем более не оцениваются коэффициенты шероховатости *n*, служащие основной характеристикой сопротивления русла, поэтому для оценки гидравлических сопротивлений целесообразно использовать комплекс:

$$m = \sqrt{I/n} = Q \cdot B^{2/3}/\omega^{5/3} \quad (2)$$

где m – параметр Великанова;

B – ширина русла, м;

ω – площадь живого сечения потока под ледяным покровом, м^2.

Комплекс $m = \sqrt{I/n}$ играет особую роль в динамике русловых потоков. Его использовал М. А. Великанов при разработке метода построения плана течений, а в гидрометрии он принят в качестве основополагающего параметра интерполяционно-гидравлических моделей расхода воды. [3, 4, 6]

Особенность комплекса m состоит в том, что при однородной шероховатости русла он сохраняет относительное постоянство, независимо от колебаний расходов воды.

В нашем случае посредством использования параметра Великанова открывается возможность: во-первых, учета изменения гидравлических сопротивлений в зимне-весенний период (в том числе при вскрытии реки); во-вторых, получения расходов, при этом формула для вычисления ежедневных расходов воды имеет следующий вид:

$$Q = m \cdot \frac{\omega^{5/3}}{B^{2/3}} \quad (3)$$

где величины ω и B определяются для каждых расчетных суток по среднесуточным уровням H на основе зависимостей $\omega = f(H)$ и $B = f(H)$ (получаемых для каждого створа), а параметр m находится по результатам линейной интерполяции значений m, определяемых по данным измерений расходов воды.

2.3 Регрессионно-гидравлическая модель

Данная модель использует уравнение регрессии, предикторами которого являются факторы, определяющие величину $K_{зим}$:

- фактор шероховатости, представленный как фактор времени, тем самым учитывается закономерность изменения гидравлических сопротивлений в зимний и переходные периоды

$$x_1 = \frac{T}{T_л} e^{-5\frac{T}{T_л}} \quad (4)$$

где T – время в сутках от начала ледообразования;

$T_л$ – продолжительность зимнего периода.

- факторы, отражающие степень стеснения русла льдом, выраженный двумя аргументами

$$x_2 = \frac{\omega_л}{\omega_o} \quad (5)$$

$$x_4 = \frac{\omega_л^2}{\omega_o^2} \quad (6)$$

где $\omega_л$ – площадь погруженного льда, м^2;

ω_o – полная площадь сечения, м^2.

- смешанные факторы, которым соответствуют аргументы

$$x_3 = \frac{\omega_л}{\omega_o}\frac{T}{T_л} e^{-5\frac{T}{T_л}} \quad (7)$$

$$x_5 = \frac{\omega_л^2}{\omega_o^2}\frac{T}{T_л} e^{-5\frac{T}{T_л}} \quad (8)$$

Таким образом, получаем уравнение множественной линейной регрессии:

$$y = K_{зим} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 \quad (9)$$

где a_0, $a_1 \ldots$ a_5 являются не только параметрами регрессии, но и обобщают физические параметры уравнения. [5, 8]

Включение в модель РГМ нелинейных членов (x_3 и x_5) считается весьма целесообразным, так как показано [23], что оно существенно расширяет возможности регрессионного анализа.

В уравнении (9) непосредственно не учтены факторы, определяющие процесс вскрытия ото льда: механическое воздействие воды на ледяной покров, нарушающее его целостность, и тепловое разрушение льда под действием солнечной радиации и положительных температур воздуха.

Их физическая оценка чрезвычайно затруднена [22, 24]. В структуре уравнения (9) совместное проявление механического и теплового факторов вскрытия рек в порядке первого приближения учтено фактором времени.

Основу для расчета параметров уравнения составляют измеренные расходы воды, которым в качестве основных аргументов ставятся в соответствие время T от начала ледовых явлений и площадь погруженного льда $\omega_л$, которая выражается через толщину ледяного покрова по данным ее непосредственных измерений.

Общая продолжительность зимнего периода – $T_л$ определяется со дня появления устойчивых ледяных образований до первого дня очищения реки ото льда.

Для получения режимных данных учета стока предлагается использовать как годовые зависимости (полученные по данным измерений текущего года), так и многолетнюю зависимость (полученная по всей совокупности наблюдений) или многолетние зависимости (полученные с учетом суровости зимы).

При этом параметры уравнения определяются по данным измерений всего зимнего периода.

3 Анализ результатов расчетов

При вычислении стока в период ледостава расчеты производились следующими методами:

- Метод зимних переходных коэффициентов ($K_{зим}$);
- Метод, основанный на применении параметра Великанова;
- Регрессионно-гидравлическая модель.

Расчеты выполнялись при наличии данных измерений расходов воды. Для расчетов были выбраны реки Бурен, Араданка, Джабаш, Мана.

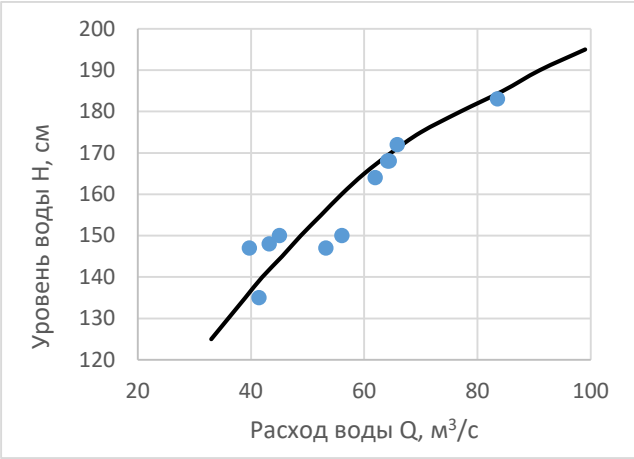
В качестве эталонных принимались ежедневные расходы воды, приведенные в гидрологическом ежегоднике ($Q_{ге}$).

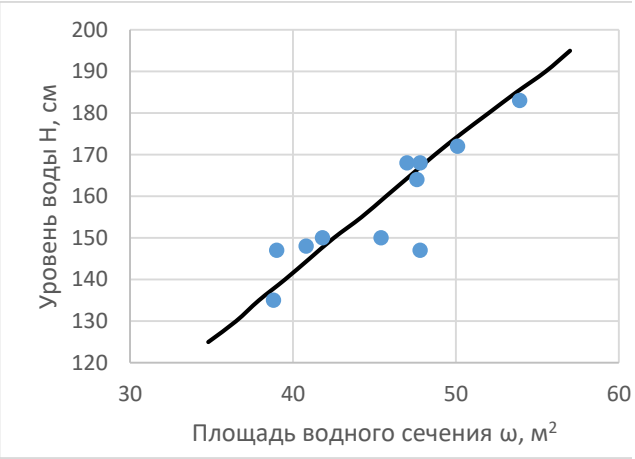
Вычисление стока на основе метода зимних переходных коэффициентов производилось следующим образом:

- За период свободного русла по каждой реке строят и увязывают кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$;
- Для каждого измеренного расхода при ледяном покрове $Q_{зим}$ определяют при том же уровне расход $Q_{св}$ по кривой $Q = f(H)$;
- По формуле (1) вычисляют зимние переходные коэффициенты $K_{зим}$. Значение коэффициента определяют для каждого измеренного при ледяном покрове расхода воды;
- По полученным значениям $K_{зим}$ стоят хронологический график;
- Для расчета ежедневных расходов воды за период ледостава с хронологического графика $K_{зим}$ снимают значение переходного коэффициента для каждого дня, по данным измерений уровней воды H определяют ежедневные значения $Q_{св}$;
- Вычисление ежедневных расходов воды за период ледостава производится по следующей формуле:

$$Q_{\text{зим}} = K_{\text{зим}} \cdot Q_{\text{св}} \qquad (10)$$

На рисунках 3.1 – 3.8 приведены кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ по рекам Бурен, Араданка, Джабаш, Мана.





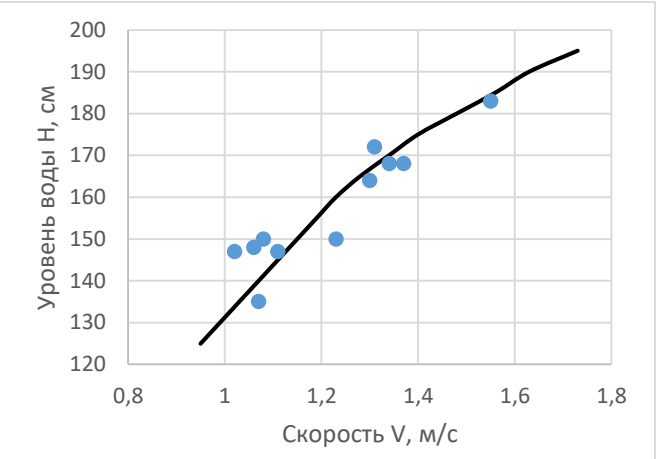
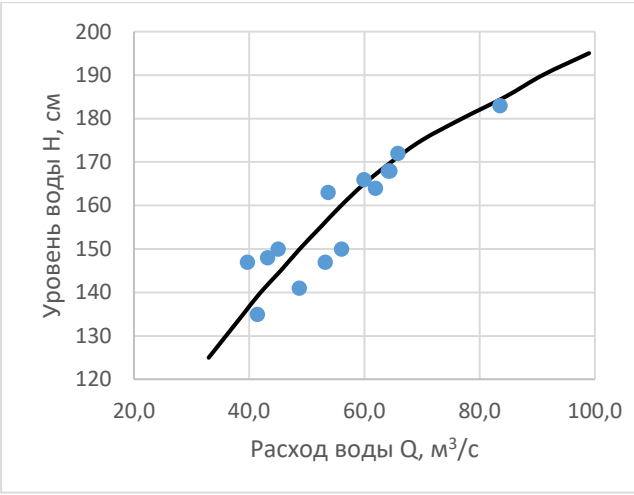
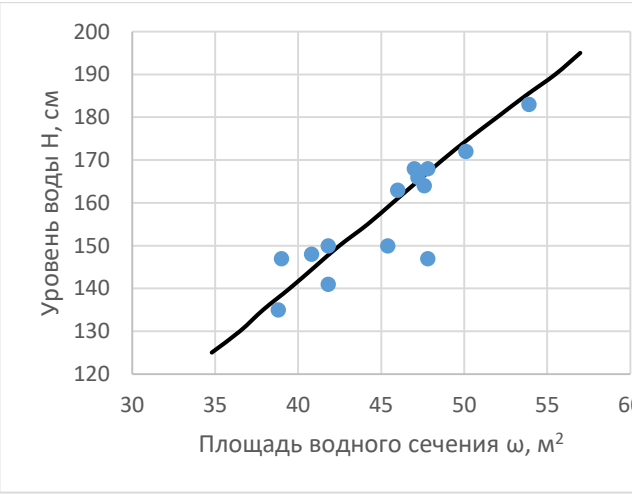


Рисунок 3.1 – Кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ р. Бурен – с. Усть-Бурен за 1969 год





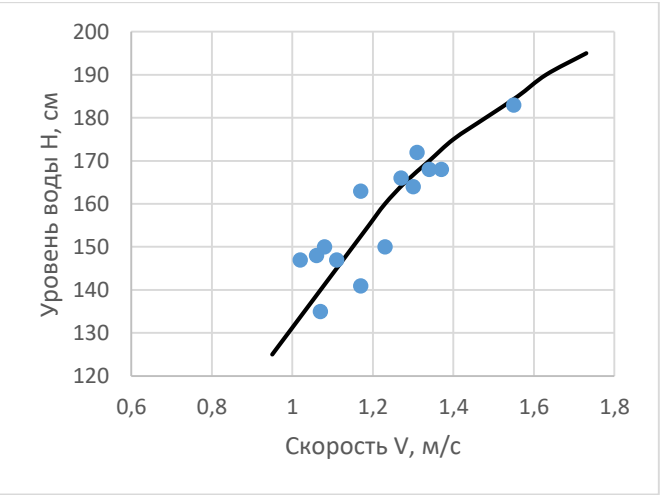
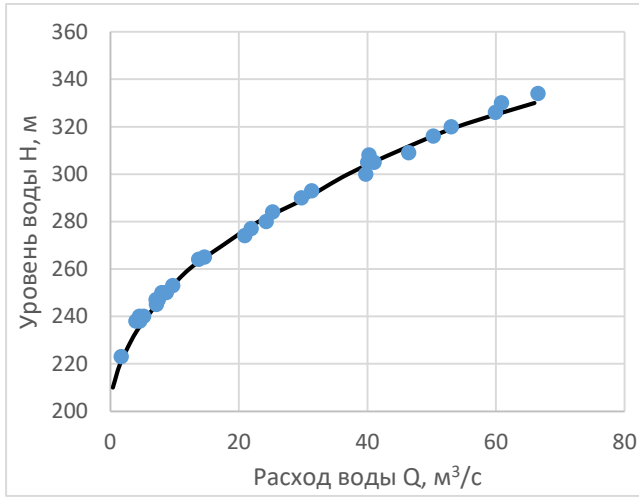
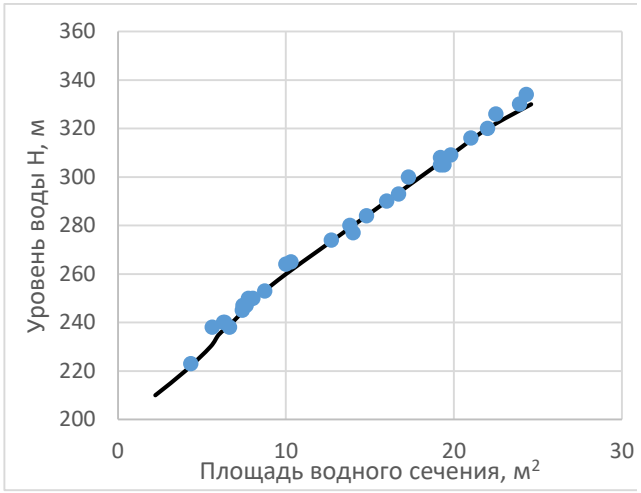


Рисунок 3.2 – Кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ р. Бурен – с. Усть-Бурен за 1970 год





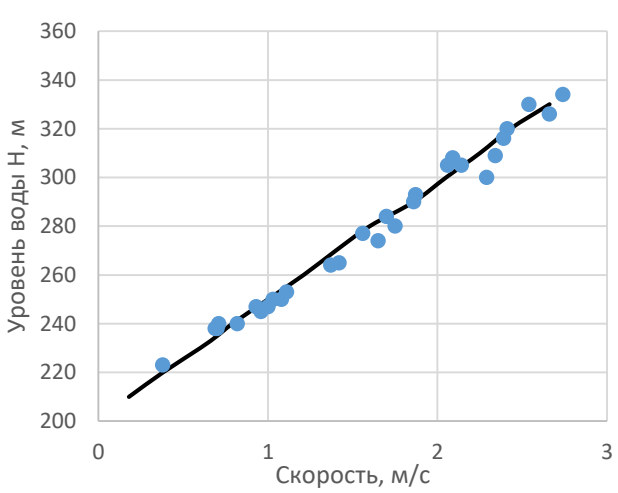
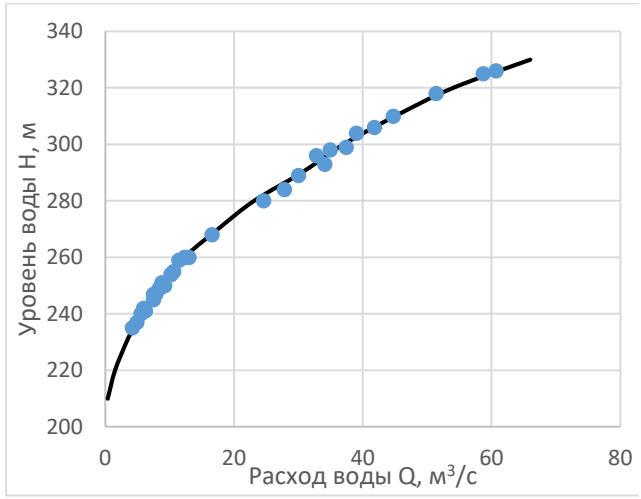
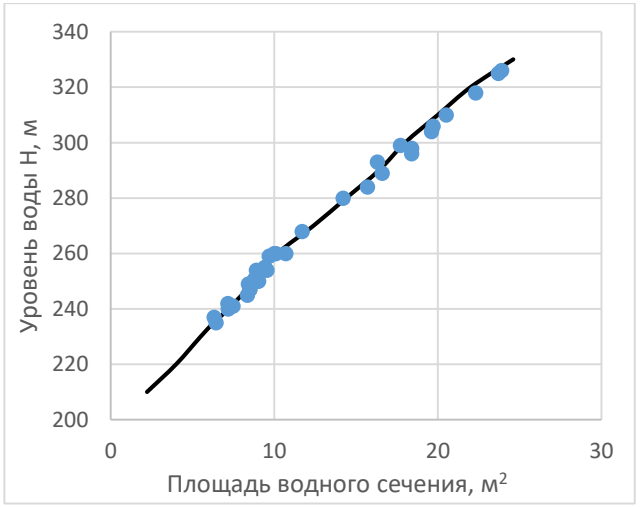


Рисунок 3.3 – Кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ р. Араданка – пос. Арадан за 1969 год





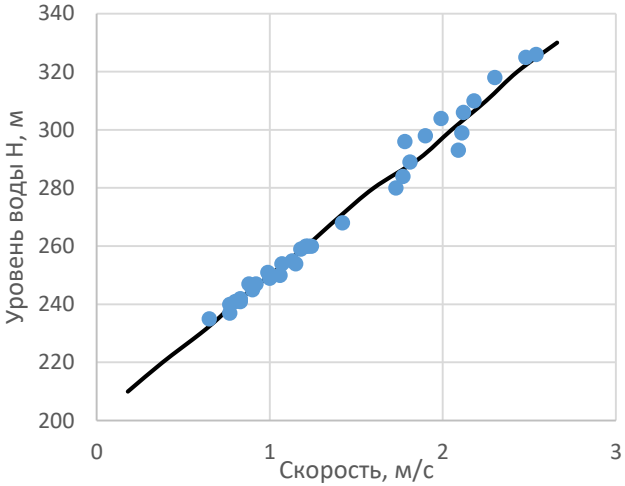
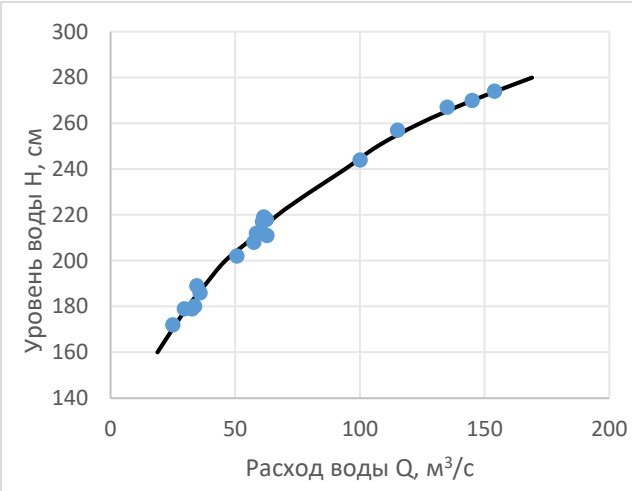
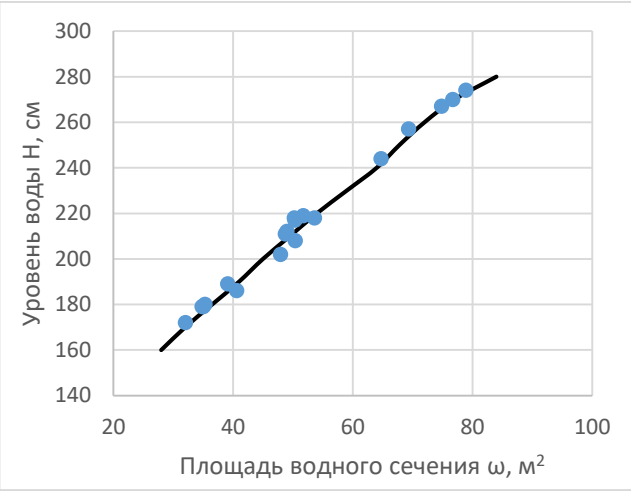


Рисунок 3.4 – Кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ р. Араданка – пос. Арадан за 1970 год





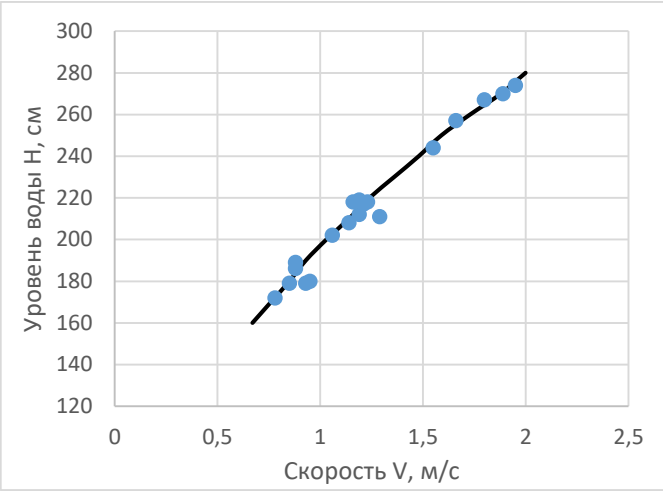
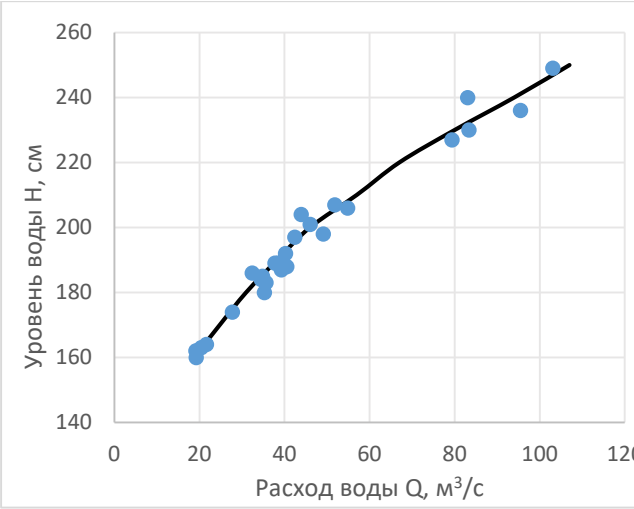
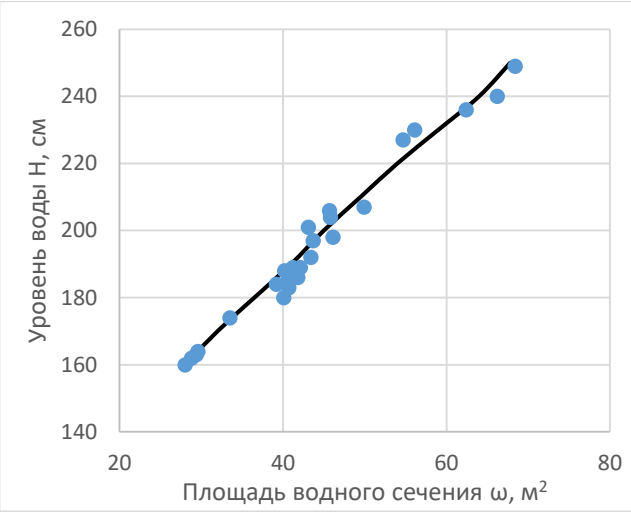


Рисунок 3.5 – Кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ р. Джабаш – з. Джебаш за 1969 год





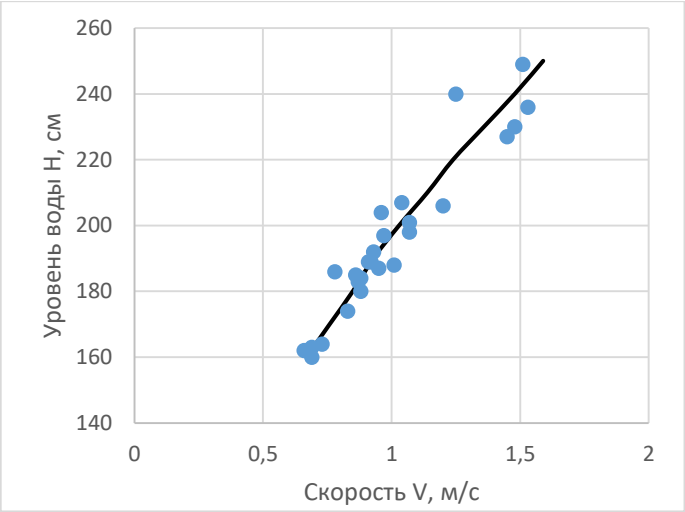
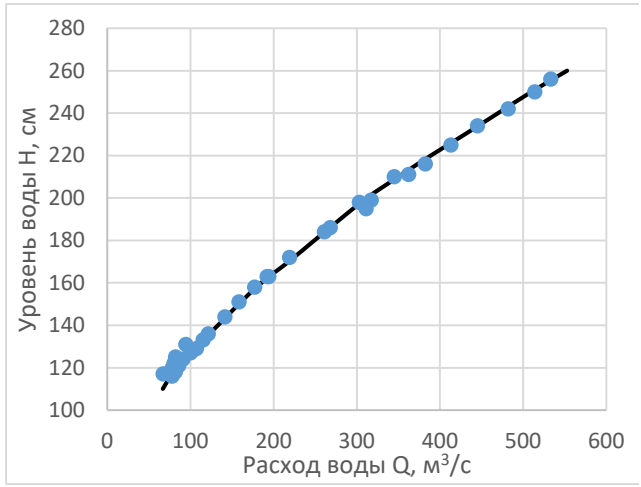
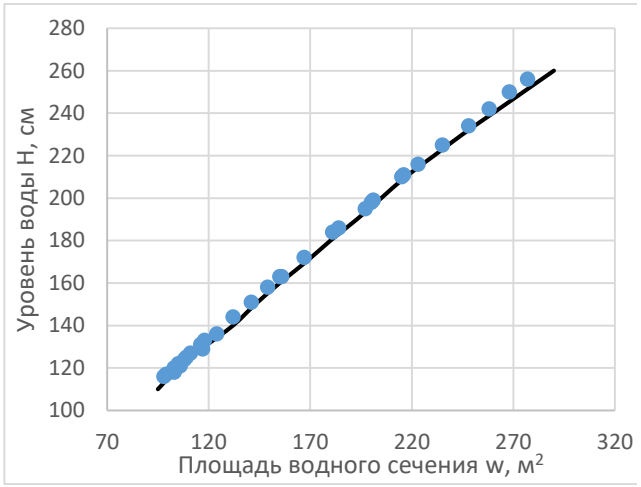


Рисунок 3.6 – Кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ р. Джабаш – з. Джебаш за 1970 год





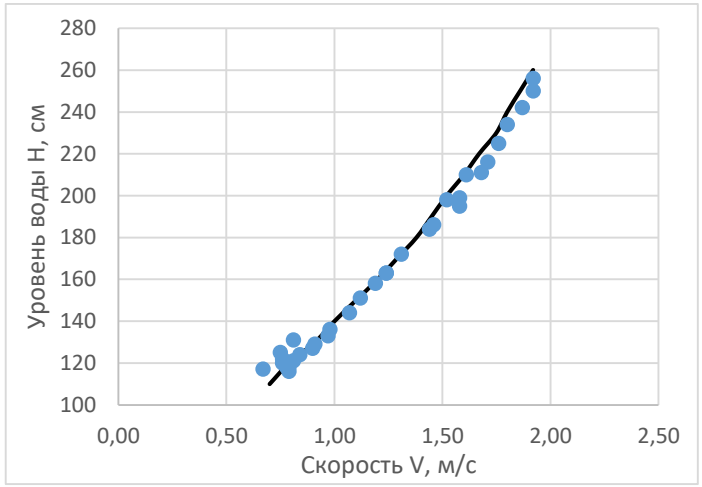
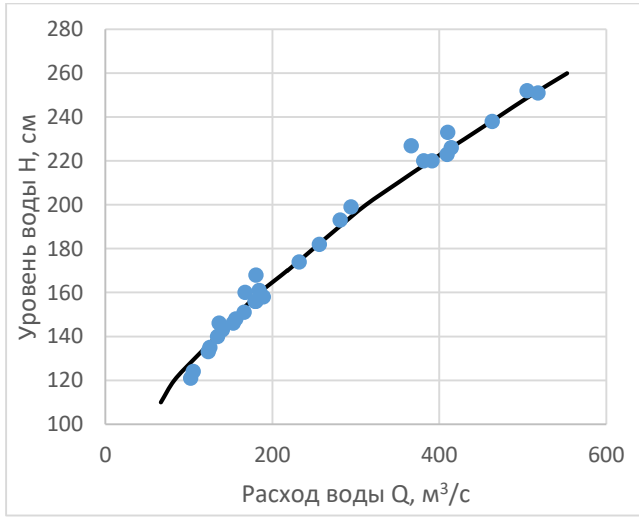
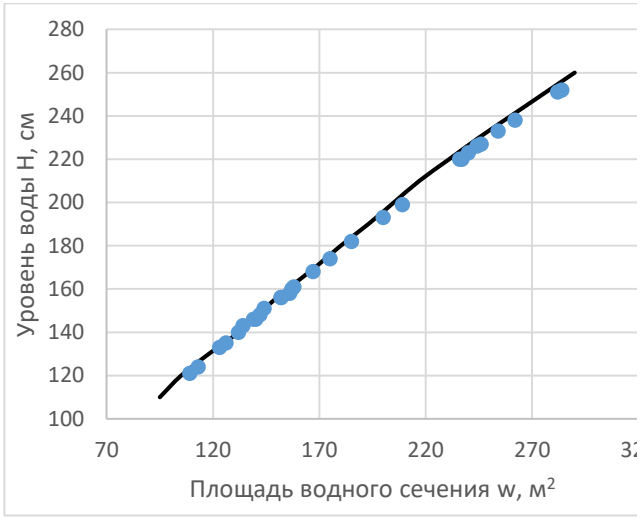


Рисунок 3.7 – Кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ р. Мана – пос. Манский за 1969 год





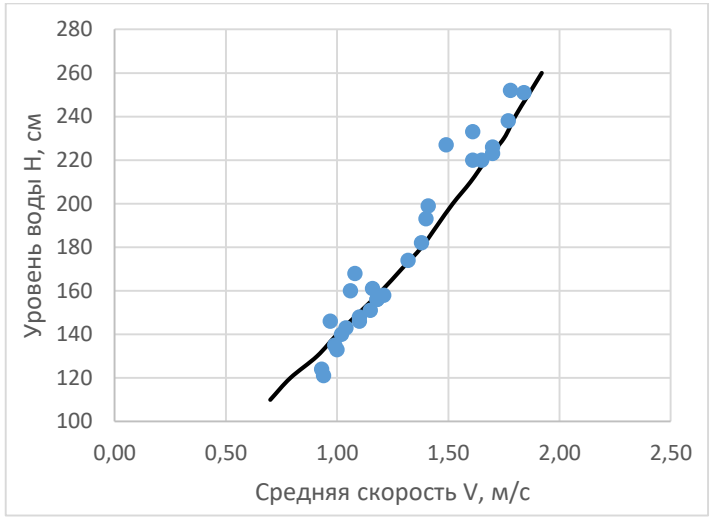


Рисунок 3.8 – Кривые зависимостей $Q = f(H)$, $\omega = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$ р. Мана – пос. Манский за 1970 год

Для исследуемых рек в таблицах 3.1 – 3.4 приведены расчеты переходных коэффициентов $K_{зим}$.

Таблица 3.1 – Расчет зимнего переходного коэффициента $K_{зим}$ р. Бурен – с. Усть-Бурен за период ледостава

Дата	*H*, см	$Q_{зим\ исх}$, м^3/с	*Qграф*, м^3/с	$K_{зим}$
16.12.1969	166	14,1	60,9	0,23
20.12.1969	169	12,6	63,8	0,20
31.12.1969	187	8,38	87,1	0,10
20.01.1970	184	8,14	83,0	0,10
31.01.1970	178	7,95	74,2	0,11
10.02.1970	179	7,02	75,6	0,09
20.02.1970	179	6,97	75,6	0,09
28.02.1970	187	6,67	87,1	0,08
10.03.1970	183	5,56	81,5	0,07
20.03.1970	179	4,94	75,9	0,07
31.03.1970	194	5,55	97,4	0,06

Таблица 3.2 – Расчет зимнего переходного коэффициента $K_{зим}$ р. Араданка – пос. Арадан за период ледостава

Дата	*H*, см	$Q_{зим\ исх}$, м^3/с	*Qграф*, м^3/с	$K_{зим}$
10.11.1969	320	2,21	54,0	0,04
15.11.1969	321	2,27	55,2	0,04
24.11.1969	277	2,16	20,5	0,11
30.11.1969	264	1,51	19,0	0,08
11.12.1969	231	1,47	3,60	0,41
20.12.1969	225	1,25	2,42	0,52
31.12.1969	225	1,05	2,42	0,43
10.01.1970	223	1,02	2,05	0,50
20.01.1970	222	1,03	1,88	0,55
31.01.1970	221	0,97	1,70	0,57
09.02.1970	220	0,95	1,53	0,62
19.02.1970	220	0,86	1,53	0,56
27.02.1970	219	0,79	1,42	0,56
10.03.1970	219	0,83	1,42	0,58
20.03.1970	218	0,92	1,30	0,71
30.03.1970	219	0,84	1,42	0,59
10.04.1970	217	0,68	1,20	0,57
16.04.1970	219	0,78	1,42	0,55
22.04.1970	221	1,03	1,70	0,61

Таблица 3.3 – Расчет зимнего переходного коэффициента $K_{зим}$ р. Джабаш – з. Джебаш за период ледостава

Дата	*H*, см	$Q_{зим\ исх}$, м^3/с	*Qграф*, м^3/с	$K_{зим}$
12.12.1969	197	11,1	45,0	0,25
23.12.1969	192	11,3	41,0	0,28
29.12.1969	181	10,6	33,0	0,32
09.01.1970	186	9,97	27,0	0,37
21.01.1970	191	9,67	40,0	0,24
10.02.1970	191	7,04	40,0	0,18
19.02.1970	187	6,72	38,4	0,18
27.02.1970	184	6,57	35,0	0,19
10.03.1970	179	6,59	31,0	0,21
20.03.1970	182	7,35	33,8	0,22
30.03.1970	191	8,65	40,0	0,22
08.04.1970	191	8,69	40,0	0,22
14.04.1970	219	29,8	66,0	0,45

Таблица 3.4 – Расчет зимнего переходного коэффициента $K_{зим}$ р. Мана – пос. Манский за период ледостава

Дата	*H*, см	$Q_{зим\ исх}$, м^3/с	*Qграф*, м^3/с	$K_{зим}$
12.11.1969	201	55,8	316	0,18
25.11.1969	184	48,1	261	0,18
18.12.1969	157	41,3	177	0,23
30.12.1969	153	48,4	166	0,29
03.01.1970	157	51,0	177	0,29
11.01.1970	155	46,1	172	0,27
03.02.1970	154	38,4	169	0,23
25.02.1970	153	35,2	166	0,21
04.03.1970	156	30,9	174	0,18
16.03.1970	156	26,9	174	0,15
30.03.1970	158	29,9	180	0,17
04.04.1970	161	27,5	188	0,15
10.04.1970	160	27,7	185	0,15

Рассчитанные ежедневные расходы воды представлены на рис. 3.9 – 3.12 в виде хронологических графиков.

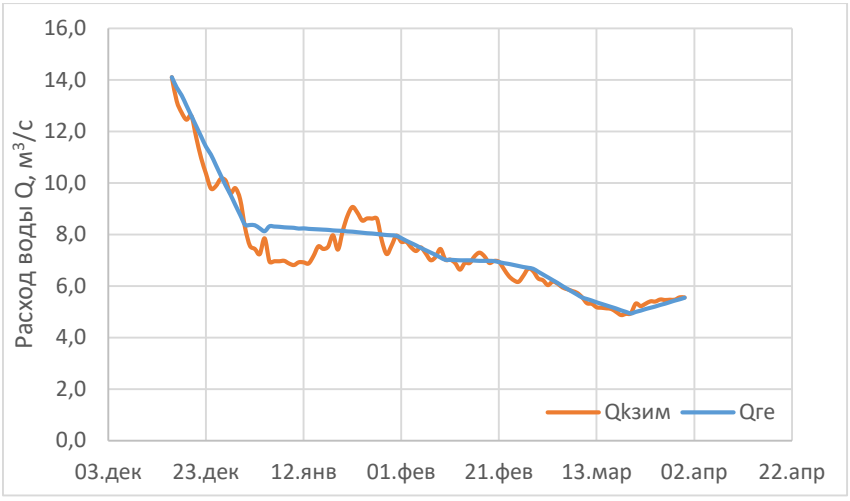


Рисунок 3.9 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Бурен – с. Усть-Бурен

Рисунок 3.10 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Араданка – пос. Арадан

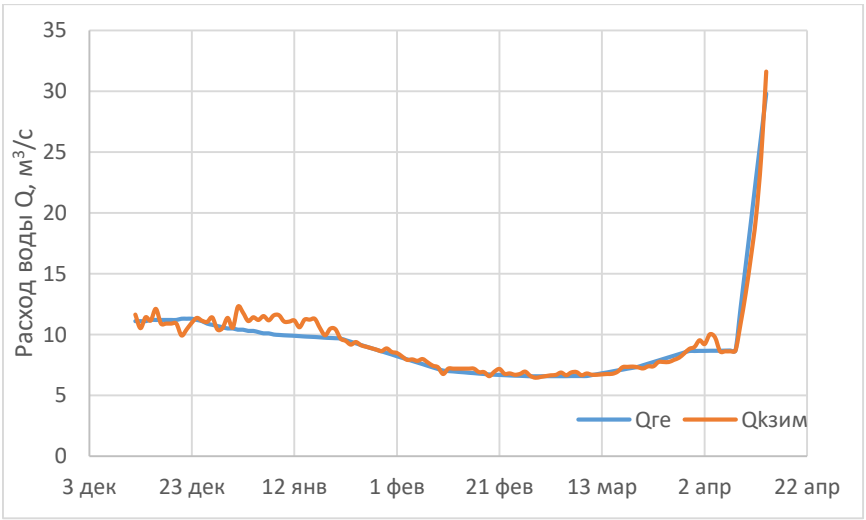


Рисунок 3.11 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Джабаш – з. Джебаш

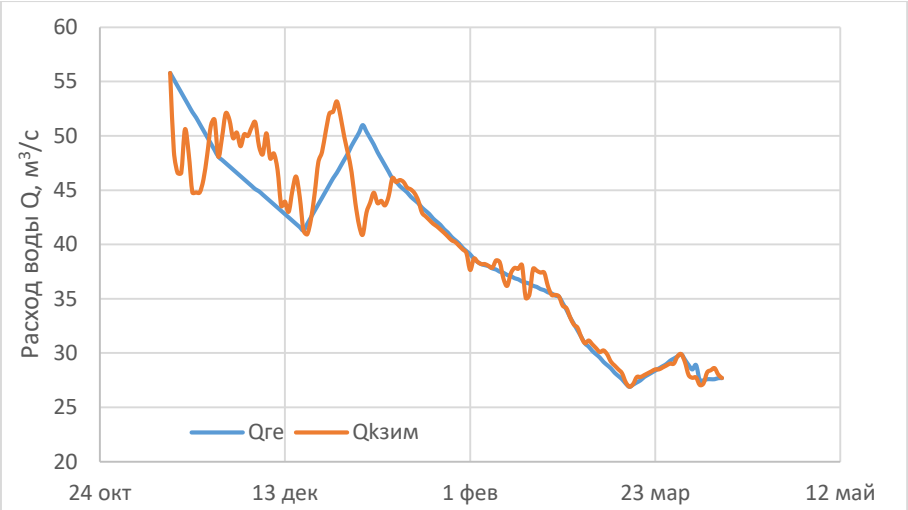


Рисунок 3.12 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Мана – пос. Манский

Вычисление стока на основе параметра Великанова производилось следующим образом:

– Для каждого измеренного расхода воды вычисляют значения параметра *m*;

– Для дней между измерениями расходов параметр *m* определяют посредством линейной интерполяции;

– Для дней между измерениями расходов воды по значению среднесуточного уровня воды *H* по зависимостям $\omega = f(H)$ и $B = f(H)$ определяют значения площади живого сечения потока (ω) и ширины русла (B);

– Ежедневные расходы воды вычислялся по формуле (3).

Примеры расчета параметра Великанова *m* для исследуемых рек приведены в таблицах 3.5 – 3.8.

Таблица 3.5 – Расчет параметра Великанова *m* за период ледостава р. Бурен – с. Усть-Бурен

Дата	*H, см*	*Q, м³/с*	*ω, м²*	*B, м*	*m*
16.12.1969	166	14,1	47,8	42,2	0,27
20.12.1969	169	12,6	48,6	42,2	0,24
31.12.1969	187	8,38	53,7	42,4	0,13
20.01.1970	184	8,14	52,8	42,3	0,13
31.01.1970	178	7,95	51,2	42,3	0,14
10.02.1970	179	7,02	51,4	42,3	0,12
20.02.1970	179	6,97	51,4	42,3	0,12

Дата	*H, см*	*Q, м³/с*	*ω, м²*	*B, м*	*m*
28.02.1970	187	6,67	53,7	42,4	0,11
10.03.1970	183	5,56	52,6	42,3	0,09
20.03.1970	179	4,94	51,4	42,3	0,08
31.03.1970	194	5,55	55,6	42,4	0,08

Таблица 3.6 – Расчет параметра Великанова *m* за период ледостава р. Араданка – пос. Арадан

Дата	*H, см*	*Q, м³/с*	*ω, м²*	*B, м*	*m*
10.11.1969	320	2,21	21,9	20,0	0,09
15.11.1969	321	2,27	22,1	20,1	0,10
24.11.1969	277	2,16	13,7	18,4	0,19
30.11.1969	264	1,51	11,3	17,9	0,18
11.12.1969	231	1,47	4,96	16,7	0,67
20.12.1969	225	1,25	3,82	16,5	0,87
31.12.1969	225	1,05	3,82	16,5	0,73
10.01.1970	223	1,02	3,44	16,4	0,84
20.01.1970	222	1,03	3,25	16,4	0,93
31.01.1970	221	0,97	3,05	16,4	0,97
09.02.1970	220	0,95	2,86	16,3	1,06
19.02.1970	220	0,86	2,86	16,3	0,96
27.02.1970	219	0,79	2,67	16,3	0,99
10.03.1970	219	0,83	2,67	16,3	1,04
20.03.1970	218	0,92	2,48	16,2	1,30
30.03.1970	219	0,84	2,67	16,3	1,05
10.04.1970	217	0,68	2,29	16,2	1,09
16.04.1970	219	0,78	2,67	16,3	0,97
22.04.1970	221	1,03	3,05	16,4	1,03

Таблица 3.7 – Расчет параметра Великанова *m* за период ледостава р. Джабаш – з. Джебаш

Дата	*H, см*	*Q, м³/с*	*ω, м²*	*B, м*	*m*
12.12.1969	197	11,1	44,2	42,3	0,24
23.12.1969	192	11,3	41,9	41,8	0,27
29.12.1969	181	10,6	37,0	40,7	0,31
09.01.1970	186	9,97	39,2	41,2	0,26
21.01.1970	191	9,67	41,5	41,7	0,23
10.02.1970	191	7,04	41,5	41,7	0,17
19.02.1970	187	6,72	39,7	41,3	0,17
27.02.1970	184	6,57	38,3	41,0	0,18
10.03.1970	179	6,59	36,1	40,5	0,20
20.03.1970	182	7,35	37,4	40,8	0,21
30.03.1970	191	8,65	41,5	41,7	0,21
08.04.1970	191	8,69	41,5	41,7	0,21

Дата	*H, см*	*Q, м³/с*	*ω, м²*	*B, м*	*m*
14.04.1970	219	29,8	54,1	44,6	0,48

Таблица 3.8 – Расчет параметра Великанова *m* за период ледостава р. Мана – пос. Манский

Дата	*H, см*	*Q, м³/с*	*ω, м²*	*B, м*	*m*
12.11.1969	201	55,8	209	133	0,20
25.11.1969	184	48,1	187	131	0,20
18.12.1969	157	41,3	152	127	0,24
30.12.1969	153	48,4	146	127	0,30
03.01.1970	157	51,0	152	127	0,30
11.01.1970	155	46,1	149	127	0,28
03.02.1970	154	38,4	148	127	0,23
25.02.1970	153	35,2	146	127	0,22
04.03.1970	156	30,9	150	127	0,18
16.03.1970	156	26,9	150	127	0,16
30.03.1970	158	29,9	153	127	0,17
04.04.1970	161	27,5	157	128	0,15
10.04.1970	160	27,7	155	127	0,16

Рассчитанные ежедневные расходы воды представлены на рис. 3.13 – 3.16 в виде хронологических графиков.

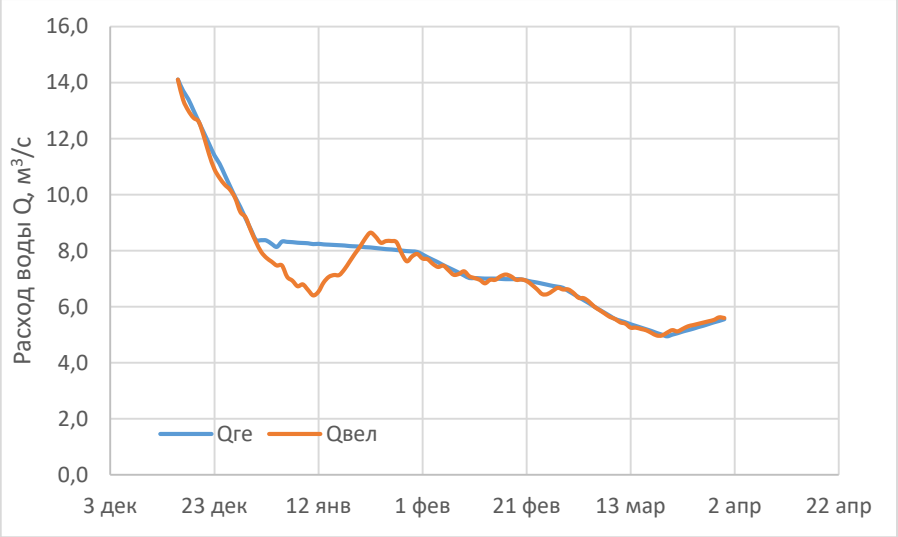


Рисунок 3.13 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Бурен – с. Усть-Бурен

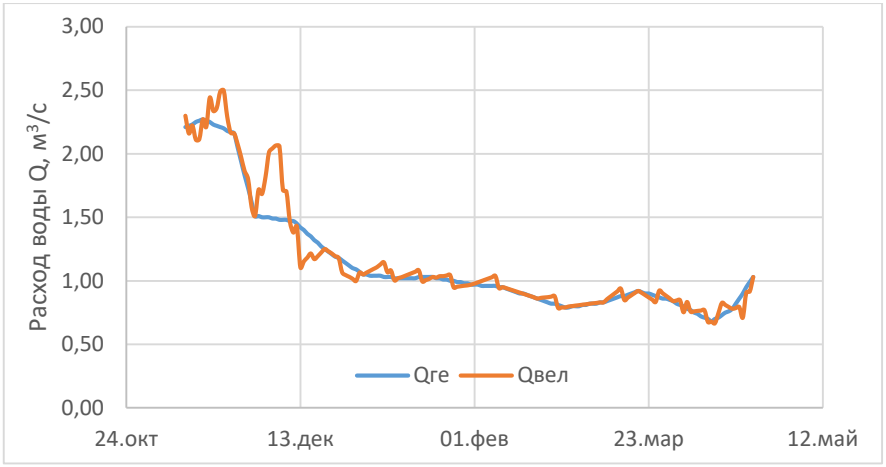


Рисунок 3.14 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Араданка – пос. Арадан

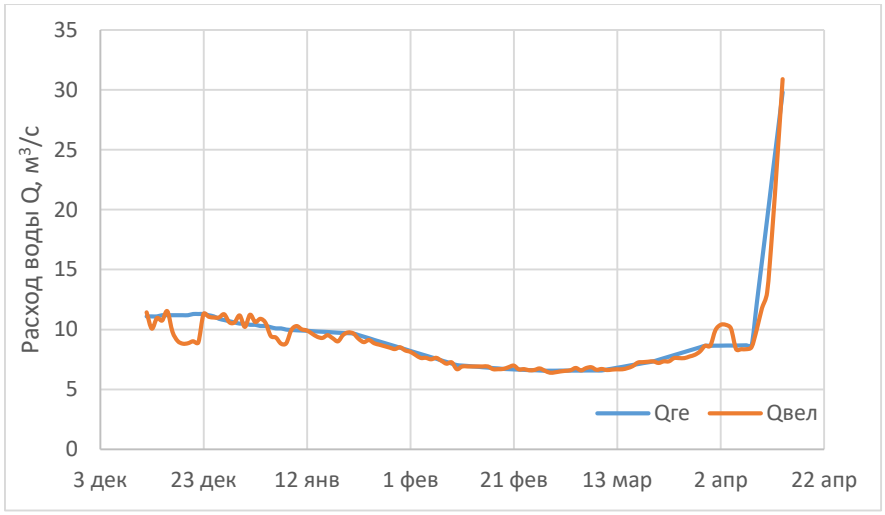


Рисунок 3.15 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Джабаш – з. Джебаш

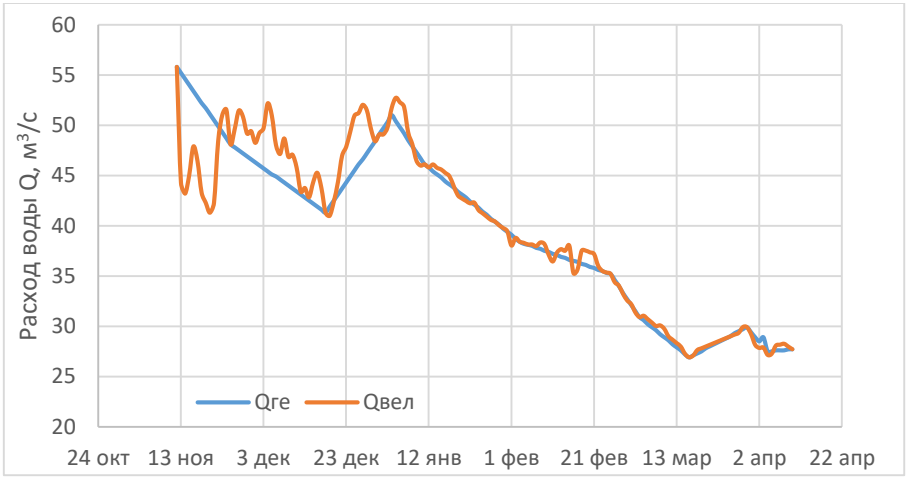


Рисунок 3.16 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Мана – пос. Манский

Вычисление стока с использованием регрессионно-гидравлической модели:

Для расчетов по модели мы использовали уравнение регрессии, предикторами которого являются факторы, определяющие величину $К_{зим}$.

Основу для расчета параметров уравнения составляют измеренные расходы воды, которым в качестве основных аргументов ставятся в соответствие время T от начала ледовых явлений и площадь погруженного льда $\omega_л$, которая выражается через толщину ледяного покрова по данным ее непосредственных измерений. Общая продолжительность зимнего периода – $T_л$ определяется со дня появления устойчивых ледяных образований до первого дня очищения реки ото льда.

Расчетное уравнение регрессионно-гидравлической модели получалось по данным измерений не за весь период ледовых явления, как рекомендуется разработчиками метода, а только за период ледостава.

В табл. 3.9 – 3.12 представлены параметры расчета стока за период ледостава по регрессионно-гидравлической модели для исследуемых рек.

Таблица 3.9 – Параметры для расчета стока по модели РГМ р. Бурен – с. Усть-Бурен

Дата	$\omega_л$	ω_0	T	$T_л$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
16.12.1969	28,9	47,0	1	135	0,007	0,61	0,0044	0,38	0,003
20.12.1969	30,0	46,2	5	135	0,031	0,65	0,0200	0,42	0,013
31.12.1969	31,4	42,2	16	135	0,066	0,74	0,0490	0,55	0,036
20.01.1970	28,4	38,4	36	135	0,071	0,74	0,0525	0,55	0,039
31.01.1970	28,6	38,4	47	135	0,062	0,75	0,0460	0,56	0,034
10.02.1970	27,8	36,8	57	135	0,052	0,75	0,0391	0,57	0,030
20.02.1970	27,8	37,4	67	135	0,042	0,74	0,0314	0,55	0,023
28.02.1970	28,4	37,0	75	135	0,035	0,77	0,0270	0,59	0,021
10.03.1970	27,6	34,9	85	135	0,028	0,79	0,0218	0,62	0,017
20.03.1970	27,0	33,6	95	135	0,021	0,80	0,0172	0,65	0,014
31.03.1970	29,3	36,6	106	135	0,016	0,80	0,0127	0,64	0,010

Таблица 3.10 – Параметры для расчета стока по модели РГМ р. Араданка – пос. Арадан

Дата	$\omega_л$	ω_0	T	$T_л$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
10.11.1969	9,90	21,5	21	190	0,064	0,460	0,029	0,212	0,014
15.11.1969	12,7	21,9	26	190	0,069	0,578	0,040	0,334	0,023
24.11.1969	2,51	7,62	35	190	0,074	0,329	0,024	0,109	0,008
30.11.1969	0,76	5,34	41	190	0,074	0,142	0,011	0,020	0,001
11.12.1969	0,93	4,70	52	190	0,070	0,198	0,014	0,039	0,003
20.12.1969	0,39	3,81	61	190	0,065	0,102	0,007	0,010	0,001
31.12.1969	0,36	3,76	72	190	0,058	0,096	0,006	0,009	0,001
10.01.1970	0,58	3,61	82	190	0,051	0,161	0,008	0,026	0,001
20.01.1970	0,36	3,53	92	190	0,044	0,102	0,004	0,010	0,000
31.01.1970	0,22	3,41	103	190	0,037	0,065	0,002	0,004	0,000
09.02.1970	0,18	3,37	112	190	0,032	0,053	0,002	0,003	0,000
19.02.1970	0,14	3,19	122	190	0,026	0,044	0,001	0,002	0,000
27.02.1970	0,37	3,10	130	190	0,023	0,119	0,003	0,014	0,000
10.03.1970	0,81	3,30	141	190	0,019	0,245	0,005	0,060	0,001
20.03.1970	0,76	3,30	151	190	0,015	0,230	0,004	0,053	0,001
30.03.1970	0,16	2,97	161	190	0,013	0,054	0,001	0,003	0,000
10.04.1970	0,04	2,52	172	190	0,010	0,016	0,000	0,000	0,000
16.04.1970	0,03	2,84	178	190	0,009	0,011	0,000	0,000	0,000
22.04.1970	0,00	3,39	184	190	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000

Таблица 3.11 – Параметры для расчета стока по модели РГМ р. Джабаш – з. Джебаш

Дата	$\omega_л$	ω_0	T	$T_л$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
12.12.1969	22,4	43,5	16	155	0,062	0,515	0,032	0,265	0,016
23.12.1969	14,7	42,8	27	155	0,073	0,343	0,025	0,118	0,009
29.12.1969	16,2	41,4	33	155	0,074	0,391	0,029	0,153	0,011
09.01.1970	20,1	42,9	44	155	0,069	0,469	0,032	0,220	0,015
21.01.1970	23,9	46,4	56	155	0,060	0,515	0,031	0,265	0,016
10.02.1970	26,8	46,3	76	155	0,043	0,579	0,025	0,335	0,014
19.02.1970	26,0	44,4	85	155	0,036	0,586	0,021	0,343	0,012
27.02.1970	25,5	43,1	93	155	0,030	0,592	0,018	0,350	0,011
10.03.1970	24,0	45,1	104	155	0,024	0,532	0,013	0,283	0,007
20.03.1970	24,7	46,3	114	155	0,019	0,533	0,010	0,285	0,005
30.03.1970	23,0	46,3	124	155	0,015	0,497	0,007	0,247	0,004
08.04.1970	20,5	38,8	133	155	0,012	0,528	0,006	0,279	0,003
14.04.1970	14,2	49,2	139	155	0,010	0,289	0,003	0,083	0,001

Таблица 3.12 – Параметры для расчета стока по модели РГМ р. Мана – пос. Манский

Дата	$\omega_л$	ω_0	T	$T_л$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
12.11.1969	90,0	213	1	170	0,006	0,423	0,002	0,179	0,001
25.11.1969	85,0	195	14	170	0,055	0,436	0,024	0,190	0,010
18.12.1969	87,8	160	37	170	0,074	0,549	0,041	0,301	0,022
30.12.1969	77,6	149	49	170	0,069	0,521	0,036	0,271	0,019
03.01.1970	80,1	155	53	170	0,066	0,517	0,034	0,267	0,018
11.01.1970	90,9	153	61	170	0,060	0,594	0,036	0,353	0,021
03.02.1970	101	150	84	170	0,042	0,675	0,029	0,455	0,019
25.02.1970	100	149	106	170	0,028	0,673	0,019	0,453	0,013
04.03.1970	104	156	113	170	0,024	0,668	0,016	0,446	0,011
16.03.1970	114	156	125	170	0,019	0,731	0,014	0,534	0,010
30.03.1970	114	157	139	170	0,014	0,727	0,010	0,529	0,007
04.04.1970	115	158	144	170	0,013	0,728	0,009	0,530	0,007
10.04.1970	115	157	150	170	0,011	0,729	0,008	0,532	0,006

Рассчитанные ежедневные расходы воды представлены на рис. 3.17 – 3.20 в виде хронологических графиков.

Рисунок 3.17 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Бурен – с. Усть-Бурен

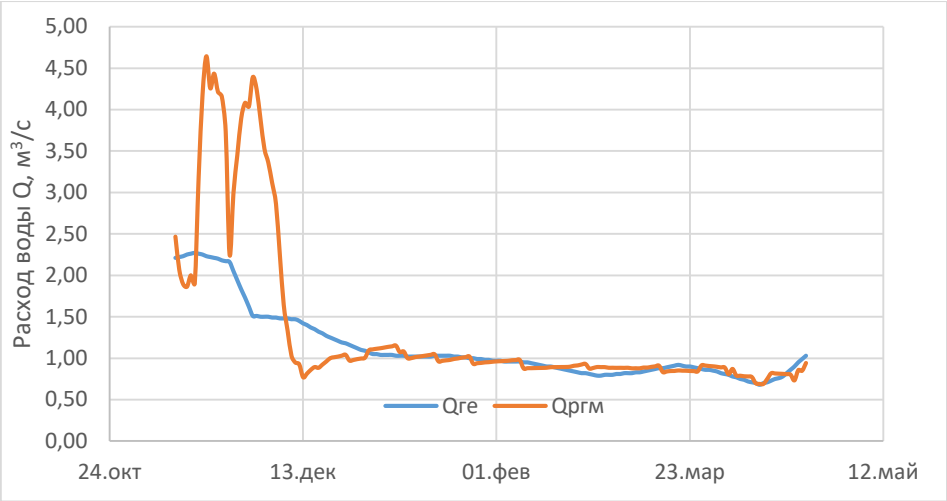


Рисунок 3.18 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Араданка – пос. Арадан

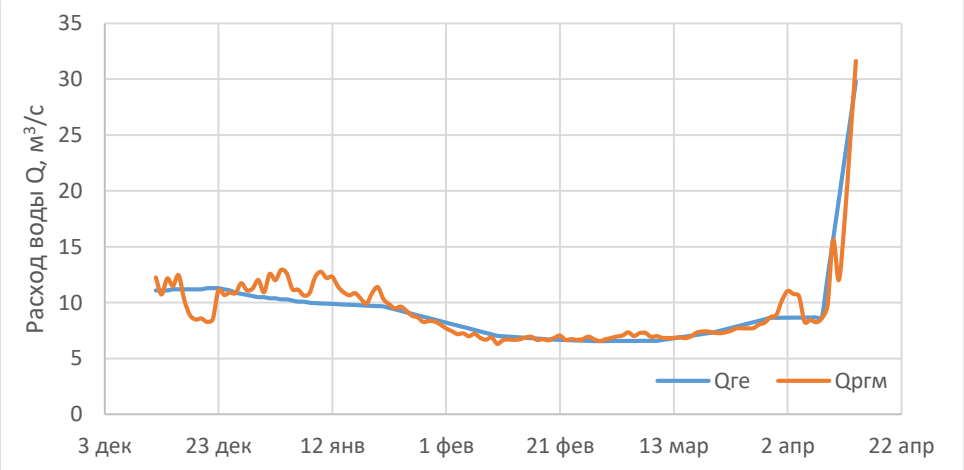


Рисунок 3.19 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Джабаш – з. Джебаш

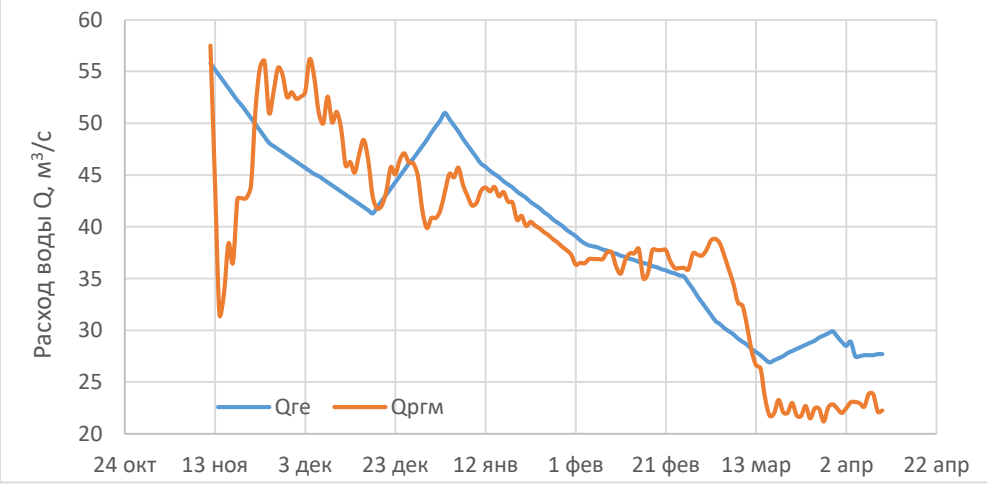


Рисунок 3.20 – Хронологический график расходов воды за период ледостава р. Мана – пос. Манский

Результаты расчетов представлены в таблице 3.13, где сравниваются средние расходы воды за период ледостава, приведенные в ежегоднике ($Q_{ге}$) и рассчитанные: по методу переходных коэффициентов $K_{зим}$, на основе линейной интерполяции параметра Великанова m ($Q_{вел}$) и регрессионно-гидравлической модели ($Q_{ргм}$).

Таблица 3.13 – Результаты расчета стока за период ледостава

Река – пост	$Q_{ге}$	$Q_{кзим}$	σ	$Q_{вел}$	σ	$Q_{ргм}$	σ
р. Бурен – с. Усть-Бурен	7,57	7,33	4,97	7,36	3,75	7,40	8,47
р. Араданка – пос. Арадан	1,13	1,14	4,00	1,15	4,90	1,34	21,2
р. Джабаш – з. Джебаш	9,18	9,34	4,73	8,89	4,65	9,25	7,98
р. Мана – пос. Манский	39,6	39,7	4,18	39,9	3,38	38,4	11,4

Характерные примеры расчетных гидрографов по трем методам представлены на рис. 3.21 – 3.24.

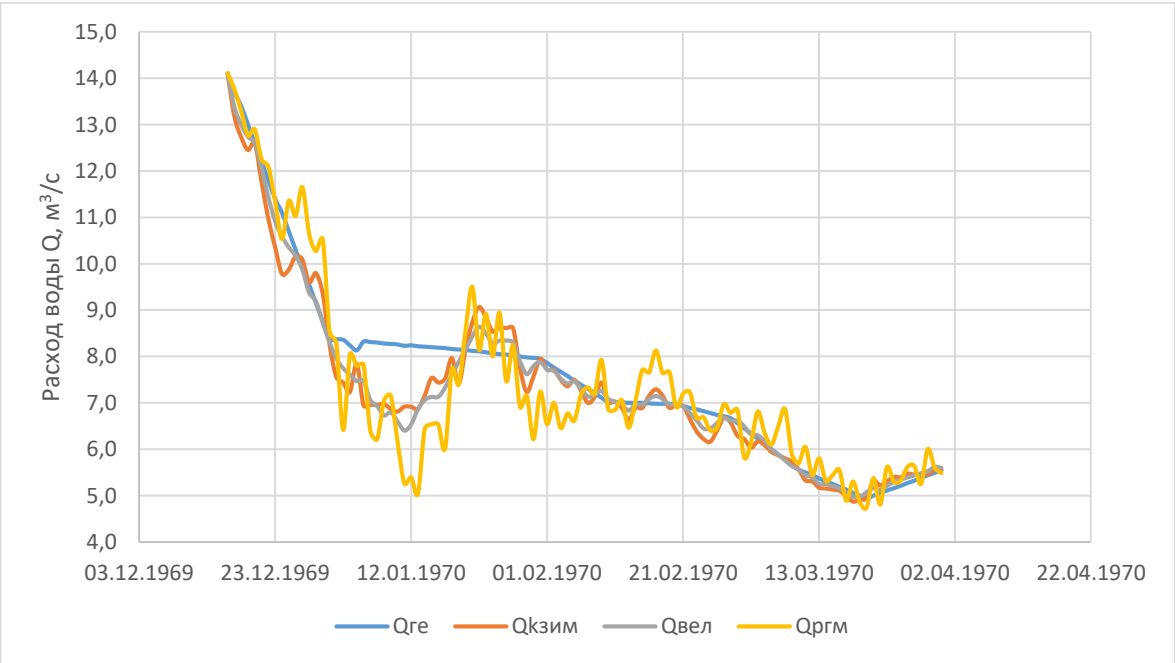


Рисунок 3.21 – Гидрограф р. Бурен – с. Усть-Бурен за период ледостава

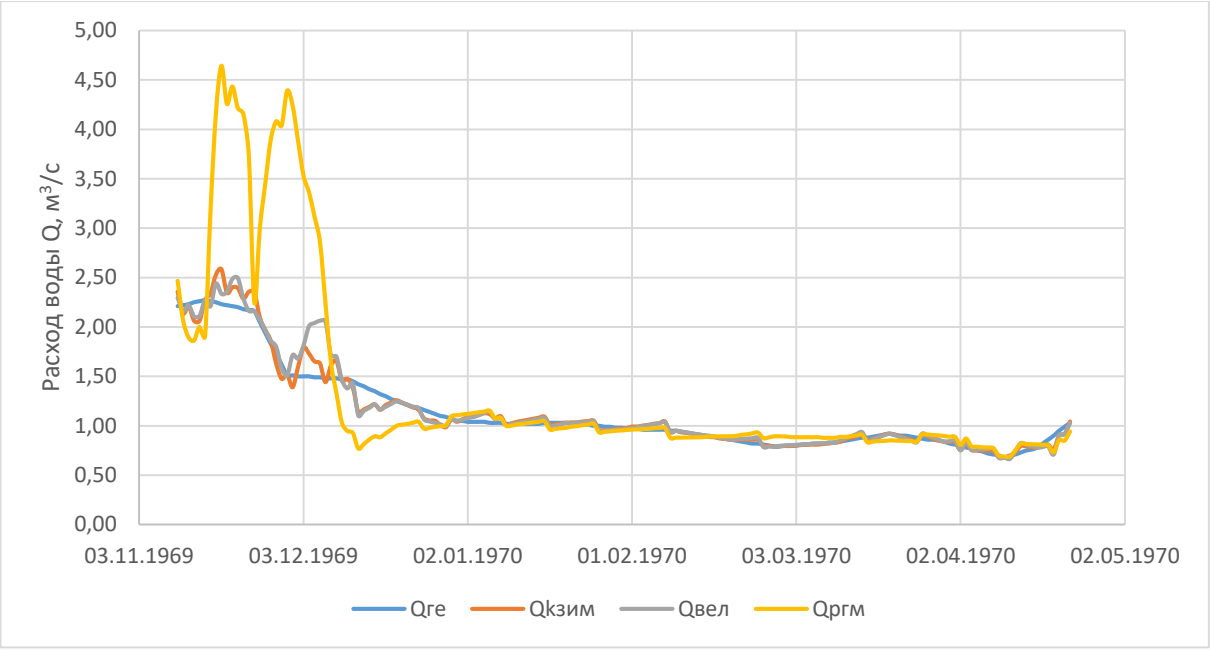


Рисунок 3.22 – Гидрограф р. Араданка – пос. Арадан за период ледостава

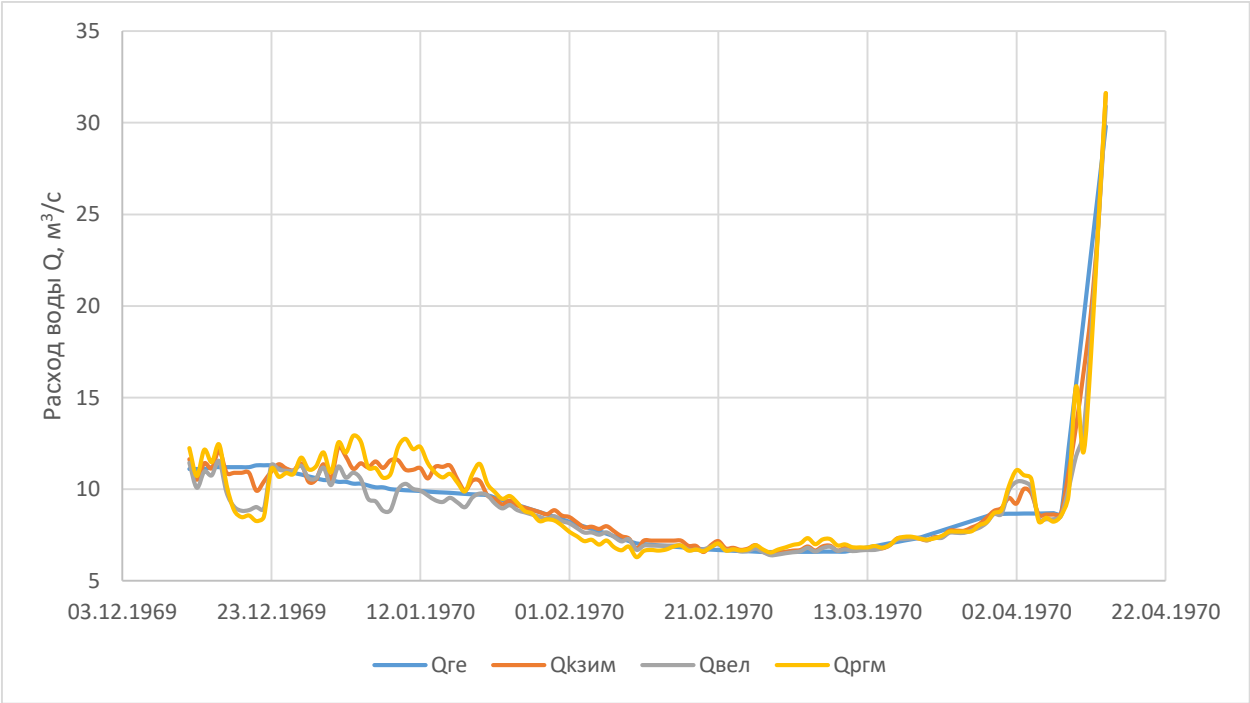


Рисунок 3.23 – Гидрограф р. Джабаш – з. Джебаш за период ледостава

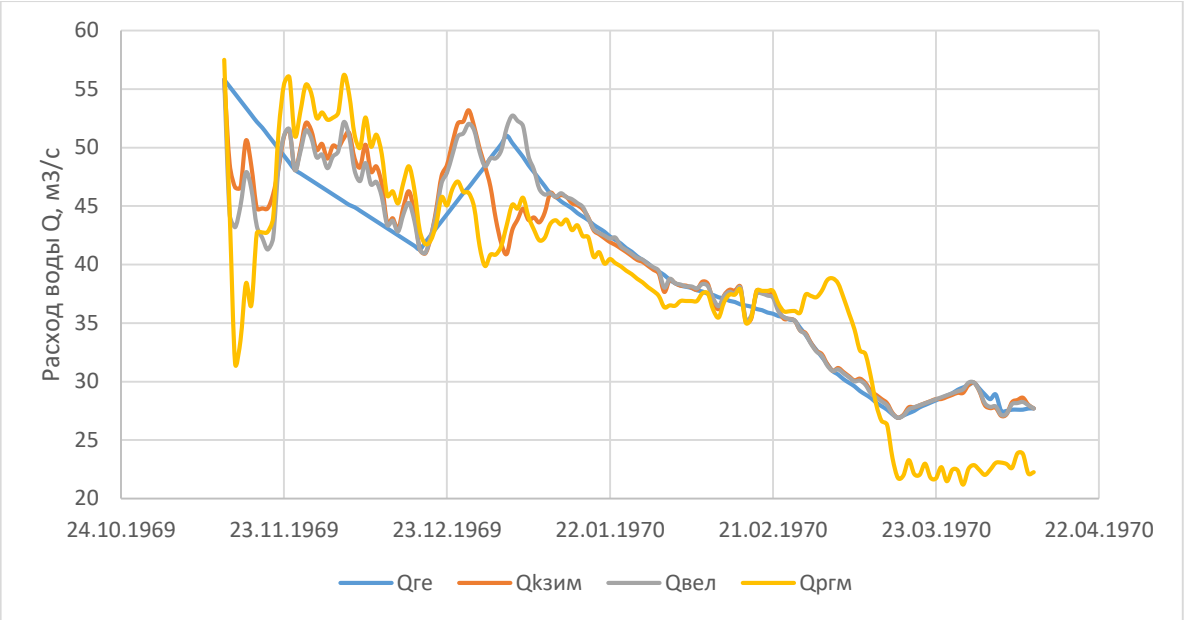


Рисунок 3.24 – Гидрограф р. Мана – пос. Манский за период ледостава

Применение переходных коэффициентов $K_{зим}$ и параметра Великанова (m) при вычислении стока в период ледостава, оказалось более эффективным (табл. 3.13). Расхождение результатов расчета ($Q_{кзим}$ и $Q_{вел}$) с данными гидрологического ежегодника варьировалось в пределах 3,38 – 4,97 %, что говорит о достаточной точности результатов расчетов.

Сопоставление результатов расчета по регрессионно-гидравлической модели с данными ежегодника свидетельствует о не достаточной точности результатов, так как относительные расхождения (σ) варьировались в пределах 7,98 – 21,2 % и в среднем составили 12,3 %.

Заключение

В ходе работы был произведен расчет стока при ледоставе для рек Бурен, Араданка, Джабаш и Мана по трем методам (метод переходных коэффициентов $K_{зим}$, метод, основанный на применении параметра Великанова m ($Q_{вел}$) и регрессионно-гидравлической модели ($Q_{ргм}$). В качестве эталонных принимались ежедневные расходы воды, приведенные в гидрологическом ежегоднике ($Q_{ге}$).

Выполнив анализ полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- Метод переходных коэффициентов дает надежные результаты, среднее значение погрешности составляет 4,47 %. При недостаточном количестве данных измеренных расходов воды метод может давать существенные погрешности при учете стока. Также метод малопригоден при использовании компьютерных технологий, так как во многом опирается на графические построения и опыт специалиста.
- Метод, основанный на применении параметра Великанова дает надежные результаты, среднее значение погрешности – 4,17 %. Параметр Великанова в полной мере отражает изменения гидравлического сопротивления русла в период ледовых явлений и служит наиболее рациональной математической основой для компьютерной технологии вычисления стока рек.
- Регрессионно-гидравлическая модель в данном случае не дает достаточно точных результатов, так как среднее значение расхождения составило 12,3 %.

Применение переходных коэффициентов $K_{зим}$ и параметра Великанова (m) при вычислении стока в период ледостава в данном случае оказалось более эффективным.

Список использованных источников

1. Руководящий документ РД 52.08.915-2021. Обработка и обобщение данных наблюдений за стоком воды на реках и каналах при подготовке справочных изданий Водного Кадастра – Санкт-Петербург ФГБУ «ГГИ» 2022 г.

2. Наставление гидрометеорологическим станциям и потам, вып.6, ч. 3 -Л.: Гидрометеоиздат, 1978

3. Векшина Т.В., Большаков В.А. Оптимизация гидрометрического учета стока зарастающих рек//Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов 29 апреля 2017 г. по материалам XVI международной научно-практической конференции/ Под общ. Ред. А.В. Туголукова – Москва: ИП Туголуков А.В., 2017 – 259с.

4. Векшина Т.В., Большаков В.А., Коринец Е.М. Экологические проблемы русловых процессов. Учебное пособие. СПб.: изд. РГГМУ, 2019 – 144с.

5. Векшина Т.В., Большаков В.А., Векшин А.К. Применение регрессионно-гидравлических моделей для учета стока. // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. №1(33). С. 89-93.

6. Векшина Т.В. Оптимизация гидрометрического учета стока на основе современных информационных систем и технологий // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. –2019. – Вып. 4 (36). –С.53 – 56.

7. Векшина Т.В. Количественная оценка пропускной способности русла на основе современных информационных систем и технологий // Евразийское Научное Объединение. – 2019. – № 4-6 (50). – С. 407–409.

8. Векшина Т.В., Большаков В.А., Векшин А.К. Современные проблемы в оценке гидравлических сопротивлений // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ: материалы международной научно-практической конференции, посвященной

90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2020 г., г. Санкт-Петербург. – С. 307 – 308.

9. В. Д. Быков, А. В. Васильев. Гидрометрия. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – с. 276 – 282.

10. Карасев И.Ф. Математические модели гидрометрического учета речного стока. – Труды ГГИ, 1978, вып.256, с.3-35.

11. Методические рекомендации по учету стока на реках в зимний и переходные периоды. – Л.: 1980, 50 с.

12. Рязанов В.С. Вычисление стока воды в зимний и переходные периоды. – Метеорология и гидрология, 1980, №7.

13. Конкина Н.Г. К вопросу о квалификации рек СССР по ледовому режиму. – Вестник ЛГУ, 1957, №18, серия геологии и географии, вып.3, с.119-127.

14. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 190 с.

15. Панов Б.П. Зимний режим рек СССР. – издательство ЛГУ, 1960. - 239 с.

16. Нежиховский Р.А. Типы замерзания рек и типы зажоров льда. – Метеорология и гидрология, 1974, №2, с.68-74.

17. Бузин В.А. Методы расчета и прогноза заторных и зажорных уровней воды / Труды ГГИ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1995. – с. 98.

18. Нежиховский Р.А. Коэффициенты шероховатости нижней поверхности шуголедного покрова. – Труды ГГИ, 1964, вып.110, с.15-35.

19. Бурдыкина А.П. Значение механического фактора при вскрытии сибирских рек. Л.: Изд. Главсевморпути, Ж. «Проблемы Арктики», №4, 1946.

20. Огиевский А.В. Гидрометрия и производство гидрометрических работ. – М., Л.: ОГИЗ, 1937. – 342 с

21. Великанов М.А. Гидрология суши. М.; Гидрометеоиздат, 1948.

22. Пиотрович В.В. О притоке тепла к нижней поверхности ледяного покрова рек. Л.: Гидрометеоиздат, Тр. ЦИП, вып.2, 1947

23. Румянцев В.А., Зорин М.В. Некоторые особенности применения аппарата множественной линейной регрессии при построении нелинейных моделей. – В кн. Труды IV Всесоюзн. гидролог. Съезда. Т.7. Л.: Гидрометеоиздат, 1976, с.30-40.

24. Пиотрович В.В. Аминева В.Я. Расчет толщины ледяного покрова на реках и водохранилищах для целей прогноза ледовых явлений. - В кн. Труды IV Всесоюзн. гидролог. Съезда. Т.7. Л.: Гидрометеоиздат, 1976, с.288-295.

25. Основные гидрологические характеристики (Государственный водный кадастр) Том 16, Выпуск 1 Ангаро-Енисейский р-н. – Л.: Гидрометеоиздат.

26. Ресурсы поверхностных вод Том 16, Выпуск 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973.

27. Алгоритм оперативного учета стока [электронный ресурс] – https://e-ecolog.ru/docs/j3ckSa4s3woGqRJI1g_pD/503

28. Влияние климатических и антропогенных факторов на гидрологический режим рек юга Красноярского края [электронный ресурс] – https://elibrary.ru/download/elibrary_32880484_26252572.pdf

29. Современные проблемы экологии в Красноярском крае [электронный ресурс] – https://,elibrary.ru/download/elibrary_49719077_45390756.pdf

30. Река Джебаш [электронный ресурс] – https://ru.wikipedia.org/wiki/Джабаш

31. Река Мана [электронный ресурс] – http://my.krskstate.ru/docs/relief/reka-mana/

32. Особенности физико-географических условий Манского района [электронный ресурс] – https://elibrary.ru/download/elibrary_25892193_69658181.pdf

33. Река Мана Красноярский Край [электронный ресурс] – https://oreke.ru/evraziya/rossiya/reka-m