



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Моделирование процесса формирования максимального
стока

Исполнитель Ситникова Яна Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«12» 06 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|--|------|
| Введение | 5 |
| 1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА | 6 |
| 1.1 Общая характеристика р. Мезень | 6 |
| 1.2 Характеристика водосбора р. Мезень | 7 |
| 1.2.1 Рельеф | 7 |
| 1.2.2 Почвогрунт | 9 |
| 1.3 Климат | 10 |
| 1.3.1 Общая характеристика климата | 10 |
| 1.3.2 Температура воздуха | 11 |
| 1.3.3 Ветер | 12 |
| 1.3.4 Осадки | 13 |
| 1.3.5 Снежный покров | 13 |
| 1.4 Гидрологическая изученность | 14 |
| 1.4.1 Гидрологический режим реки Мезень | 14 |
| 1.4.2 Условия формирования максимального стока | 16 |
| 1.5 Исходные данные для расчетов | 17 |
| 1.5.1 Метеорологические станции – список и подбор станций | 17 |
| 1.5.2 Гидрологические посты – список и общая характеристика | 18 |
| 1.5.3 Гидрометеорологические характеристики – список и комментарий | 19 |
| 2 МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ | 20 |
| 2.1 Модель формирования запасов воды в снеге | 21 |
| 2.2 Методика определения устойчивого перехода температуры через 0°С | 22 |
| 2.3 Методика расчета запасов воды в снеге | 23 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.4 | Методика параметризации модели формирования запасов воды в снеге | 23 |
| 2.4.1 | Параметризация с данными маршрутных съемок | 24 |
| 2.4.2 | Параметризация без данных маршрутных съемок | 25 |
| 2.4.3 | Оценка точности расчетов | 26 |
| 2.5 | Методика расчетов водоотдачи из снега и водоподачи на водосбор | 27 |
| 2.6 | Модель формирования стока | 28 |
| 2.7 | Особенности моделирования процесса формирования стока в зимний период | 29 |
| 3 | СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА | 30 |
| 3.1 | Определение устойчивого перехода температуры через 0°C | 30 |
| 3.2 | Расчеты запасов воды в снеге | 32 |
| 3.2.1 | Параметризация модели формирования запасов воды в снеге | 32 |
| 3.2.2 | Оценка прогноза формирования запасов воды в снеге на независимом материале | 37 |
| 3.2.3 | Оценка результатов моделирования процесса формирования запасов воды в снеге при наличии данных маршрутной съемки | 38 |
| 3.2.4 | Расчет водоотдачи и водоподачи на водосбор | 40 |
| 3.3 | Моделирование процесса формирования стока | 41 |
| 3.3.1 | Холодный период | 41 |
| 3.3.2 | Теплый период | 47 |
| 3.3.3 | Параметризация модели формирования речного стока | 48 |
| 3.3.4 | Оценка прогноза речного стока на независимом материале | 49 |
| | Заключение | 51 |
| | Список использованных источников | 52 |
| | Приложение А – Хронологический график хода температур и сумм температур с 2008 по 2020 г. по гидропосту Макариб | 54 |

| | |
|---|----|
| Приложение Б – Графики сравнения фактических и расчетных значений запасов воды в снеге | 57 |
| Приложение В – Хронологические графики хода фактических температур и водоотдачи на водосбор за период с 2009 по 2020 г. по гидропосту Макариб | 76 |
| Приложение Г – Графики сравнения фактических и прогнозных расходов воды по гидропосту Макариб с 2009 по 2020 г. | 82 |

ВВЕДЕНИЕ

Темой исследования выпускной квалификационной работы является разработка и реализация системной модели формирования стока. Расчеты проводились в программе *MS Excel* из-за простоты использования и возможности визуализации результатов в виде графиков.

Актуальность данной работы заключается в возможности использования результатов расчетной задачи для дальнейшего прогнозирования максимального стока.

Цель работы – параметризация моделей формирования запасов воды в снеге и формирования стока на многолетнем интервале 2008 – 2017 годов, а также проверка методики расчетов на независимом материале 2018 – 2020 годов.

Предметом исследования являются запасы воды в снеге, водоподача на водосбор и сток.

В качестве объекта исследования выбран водосбор реки Мезень.

1 ФИЗИКО – ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

1.1 Общая характеристика реки Мезень

Река Мезень расположена в северной части России и является одной из крупнейших рек европейского Севера России. Принадлежит бассейну Белого моря. Собственный бассейн реки площадью 79 650 км² захватывает три административно-территориальные области: Архангельскую, Республику Коми и Ненецкий автономный округ. На рисунке 1.1 изображен бассейн реки Мезень.



Рис.1.1 – Бассейн реки Мезень

Водораздел рек Мезень и Вычегда является юго-восточной границей бассейна, часть Тимана – северо-восточной, а линия водораздела рек Мезень и Северная Двина – западной. С севера бассейн омывается Белым морем.

Протяженность реки Мезени от истока до устья составляет 966 км, что делает ее самой длинной рекой, впадающей в Белое море. Приблизительно 15 187 рек и ручьев питают р. Мезень, из которых наиболее крупными правыми притоками являются реки Кыма, Пижма, Пеза и Сула, а левыми – Большая Лоптюга, Пысса и Вашка.

Река Мезень берет свое начало в верховых болотах республики Коми, расположенных на западном склоне Четласского камня – наиболее высокого отрога Тиманского кряжа.

Верхнее течение реки имеет юго-западное направление и характеризуется множеством порогов и перекатов. Берега преимущественно скалистые и высокие. Ширина русла колеблется от 8 до 15 м.

Из-за условий пересеченного рельефа в среднем течении р. Мезень часто меняет направление. Сначала она огибает один из отрогов Тимана, образуя пятисоткилометровый крюк, и поворачивает на запад, затем меняет свое направление на северное и протекает по территории Архангельской области. Русло принимает сильную извилистость, а берега становятся низкими, часто заболоченными. Долина реки составляет около 1 км. Далее река при пересечении гряд Тиманского кряжа врывается в их склоны на глубину до 70 м. Общая величина падения ее русла составляет 0,35 м/км, скорость может достигать до 3 км/ч, образуя большое количество порогов. Речная долина расширяется до 2–5 км после впадения р. Ирвы. Ширина русла на этом участке составляет в среднем 150 м. Берега обрывистые, высотой до 35 м. Ниже устья притока р. Камы пороги сменяют перекаты. Берега становятся выше и круче, образуя многочисленные овраги.

В нижнем течении, после впадения р. Вашки, р. Мезень резко поворачивает на север. Наблюдаются максимумы ширины русла – до 2,5 км. Встречаются острова и песчаные мели.

Устьем реки Мезени является Мезенская губа Белого моря, которая своей приливной волной, распространяющейся вверх по течению р. Мезень, вызывает обратные течения и подпорные явления [1].

1.2 Характеристика водосбора реки Мезень

1.2.1 Рельеф

Территория областей, которые затрагивает река Мезень, расположена в главном прогибе Русской платформы и охватывает северную часть Русской равнины. Сам речной бассейн находится в центре Мезенской синеклизы и состоит из двух геологических структур: Балтийского кристаллического щита на западе и Тиманского кряжа на востоке. Данные геоструктуры представлены чередой выпуклых частей земной коры и лежащих между ними впадин. Между Балтийским кристаллическим щитом и Тиманом расположена Онего-Двино-Мезенская впадина. Поверхность бассейна с юга на север понижается, определяя тем самым направление стока реки.

Территория бассейна реки Мезень сложена песчаниками пермского, триасского и юрского возраста и коренными породами, преимущественно мергелями и глинами, которые покрывает слой четвертичных отложений мощностью 15 – 20 м. Четвертичные отложения представлены нижней мореной (рисской), морскими межледниковыми и озерными континентальными осадками, верхней мореной (вюрмской) и флювиогляциальными песками.

От Тиманских возвышенностей до холмисто-моренного водораздела рек Мезени и ее притока Вашки пески тянутся широкой полосой. Стоит отметить, что подобный ландшафт встречается также на севере и востоке от с. Кослан Республики Коми.

Долина реки Мезень более широкая в верхнем и среднем течении, чем в нижнем, что очень отличает ее от обычной формы речных долин, которая расширяется к устью. Это явление объясняется сложением нижней части течения среди легкорастворимых пород: пермских мергелей и гипсов, каменноугольных известняков и доломитов. В таких условиях развивается глубинная эрозия вместо боковой, что ведет к появлению каньоно-образной долины.

1.2.2 Почвогрунт

Особенности почвогрунтов на данной территории характеризуются следующим:

- рядом с Мезенской петлей и на смежном участке бассейна реки Вашки распространены выходы минеральных вод пермских отложений;
- леса составляют примерно 87% площади речного бассейна, 12% занимают болота, и лишь 1% – сенокосы, пастбища и пахотные земли;
- вследствие нахождения территории, дренируемой р. Мезенью и ее притоками в зоне избыточного увлажнения, происходит массовое заболачивание водосбора и появление развитой речной сети, характеризующейся полноводностью рек. Озероформирование развивается в понижениях местности.

Почвы на рассматриваемой территории представлены тремя типами:

- дерновым;
- подзолообразовательным;
- болотным;
- интразональным.

В районе Тимана местами встречаются перегнойно-карбонатные.

Дерновый тип характеризуется накоплением гумуса в перегнойно-аккумулятивном горизонте и встречается лишь там, где присутствует травяная растительность, что встречается довольно редко.

Подзолообразовательный тип наиболее распространен в лесной зоне с преобладанием хвойных пород, а также на равнинах с почвенным покровом, сформированном, главным образом на бескарбонатных породах.

На слабоводопроницаемых понижениях рельефа и плоских равнинах развит болотный тип почв.

Около 5% территории занимают интразональные почвы, которые не характерны для лесной зоны данной области. К таким почвам относятся пойменные (аллювиальные), образованные вследствие периодического затопления паводковыми водами, сопровождающимся привносом и отложением взмученного материала на пойме реки, а также почвы в приливно-отливной полосе в устье реки. На образование таких почв влияют местные особенности рельефа [2].

1.3 Климат

1.3.1 Общая характеристика климата

Из-за большой протяженности территории бассейна р. Мезени с севера на юг и с запада на восток, а также разнообразия физико-географических условий, отдельные части района очень отличаются друг от друга.

Рассматриваемая территория представляет собой обширную лесистую равнину, слабо защищенную от влажных морских воздушных масс с Атлантического океана, выносимых северно-западным переносом.

Климат данной области формируется в условиях малого количества солнечной радиации, интенсивного переноса воздушных масс и влияния

северных морей, что, в свою очередь, существенным образом отражается на распределении температур воздуха по сезонам.

На территорию большой эффект оказывает активная циклоническая деятельность и постоянная смена воздушных масс. Причиной изменения широтной зональности и непостоянства метеорологических условий является циркуляция воздуха. Зимой, принесенный теплый и влажный воздух вызывает обильные снегопады и потепление. Летом прохладный и влажный воздух способствует понижению температуры и выпадению дождей. На востоке атлантический климат сменяется континентальным, который характеризуется теплым летом и холодной зимой.

Сезонное потепление зависит от циклонов, приносимых с Черного и Средиземного морей, что вызывает вскрытие рек весной и нетипично теплую осень, называемую «бабьим летом».

1.3.2 Температура воздуха

На рассматриваемой территории теплый период начинается в начале апреля в ее южной части, а на северной с последней декады апреля – начала мая. Переход среднесуточной температуры через 0 к отрицательным значениям наблюдается во второй – третьей декадах октября. На побережье разность температур холодного и теплого периодов составляет 20 – 24 °С, в континентальных районах – 29 – 33 °С. Самым теплым месяцем является июль, самым холодным – январь, на побережье – февраль. Картина годового хода температуры воздуха примерно одинакова на всей территории бассейна, в отличие от ее амплитуды, которая заметно различается.

Зима более мягкая на побережье, ее средняя температура колеблется от -8 до -10 °С. Континентальность климата растет по мере продвижения в глубь территории, поэтому средняя зимняя температура понижается до -14 °С.

Минимальная температура на северо-востоке территории может опускаться до $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, на побережье около $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Начало весны приходится на первую декаду апреля в юго-западных районах и на вторую – третью декаду мая на северо-восточных. Из-за прихода холодных северных воздушных масс возможен возврат морозов.

Обычно лето на большей части территории начинается в первой декаде июня, а на юго-западной части – во второй – третьей декаде июня. Средняя температура воздуха понижается с юга на север с $14 - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $10 - 12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ее максимальное значение может достигать в среднем $33 - 36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Осень наступает во второй декаде августа – первой декаде сентября.

1.3.3 Ветер

Состояние поля атмосферного давления оказывает прямое влияние на географическое распределение направлений ветра и его скорости. В холодное время года ветровой режим территории формирует Исландский минимум. В период с сентября по март преобладают ветры южной четверти, в апреле могут быть и северной. Интенсивность общей циркуляции уменьшается с мая по сентябрь. На большей части территории области преобладают ветры южного направления, хотя особенности рельефа в отдельных частях местности могут оказывать слабое влияние на ветровой режим.

На побережье наблюдаются наибольшие средние годовые скорости ветра, которые по мере продвижения к югу территории снижаются ввиду увеличения защищенности местности – лесной растительности и населенных пунктов. Также на побережье более четко выражен годовой ход среднемесячных значений скорости ветра, чем в континентальных районах.

Наиболее высокие скорости наблюдаются в осенне-зимний период из-за активной циклонической деятельности в северном полушарии в это время.

1.3.4 Осадки

Бассейн р. Мезень находится в зоне постоянного увлажнения, поэтому характер атмосферных осадков зависит от циклонической деятельности. Обильные осадки приносятся южными циклонами, а продолжительные с наименьшей интенсивностью – западными.

В течение всего года осадки распространены неравномерно. На зимние месяцы и начало весны приходится минимум осадков, максимум наблюдается в июле и в августе. Также в этот период наблюдаются наибольшие значения суточного максимума осадков вследствие ливневых дождей, приносимых фронтами.

Относительная влажность воздуха имеет более высокие значения на побережье и уменьшается по мере удаления от моря. Максимальные значения отмечены в октябре – ноябре, минимальные – весной или в начале лета. Также с удалением от моря возрастает годовая амплитуда осадков.

Годовой ход числа влажных дней почти совпадает с ходом средней относительной влажности, максимум которой наблюдается в осенне-зимний период, а минимум – в весенне-летний. Количество влажных дней на побережье больше, в связи с чем сухие дни наблюдаются достаточно редко. Однако, количество сухих дней возрастает при удалении от моря, и обычно они наблюдаются в весенне-летний период.

1.3.5 Снежный покров

Снежный покров на юге территории формируется во второй половине октября, на севере – в конце сентября – начале октября.

Во второй половине октября – начале ноября, как правило, формируется устойчивый снежный покров. Его максимальная толщина наблюдается в

середине марта и достигает 75 – 85 см на защищенных лесных участках и 10 – 20 см на открытых территориях. В середине апреля в южной части территории происходит раннее разрушение устойчивого снежного покрова. В северных районах этот процесс может продолжаться до начала мая.

Метели, преобладают в период с октября по май, но иногда их фиксируют и в летне-осеннее время. Грозы наблюдают преимущественно в зимний период, хотя данное природное явление характерно для теплого времени года. Кроме того, не исключено выпадение града, сопровождающееся, как правило, интенсивными ливнями и шквалистым ветром [3].

1.4 Гидрологическая изученность

1.4.1 Гидрологический режим реки Мезень

Гидрологический режим р. Мезень отличается большими сезонными колебаниями расходов и уровней воды. Половодье наблюдается в мае-июне, летом часто бывают дождевые паводки, которые приводят к значительным кратковременным подъемам уровней. В устье реки средний расход воды обычно составляет около 886 м³/с, а среднегодовой – 27 км³/год. В верхнем течении реки у деревни Макариб расход воды во время весеннего половодья может увеличиться в 100 раз по сравнению с меженным уровнем. Зафиксированный исторический максимум расхода был отмечен 26.05.1966 г. и составил 1740 м³/с, что превышает среднегодовые значения на судоходном участке реки в нижнем течении почти в три раза.

Верхнее течение частично зарегулировано карстом. Здесь среднегодовой модуль стока на 7% ниже зональной величины. Также на данном участке реки наблюдаются высокие дождевые паводки, что приводит к увеличению стока в десятки раз по сравнению с летним меженным значением. Максимальное

значение расхода воды у деревни Макариб во время дождевого паводка составило 510 м³/с.

В нижнем течении сезонные колебания расходов и уровней тоже довольно велики. Наибольший расход воды был зафиксирован 02.06.1952 г. и составил 9530 м³/с, наименьший 21.03.1930 г. – 87,1 м³/с. Уровень воды у д. Малонисогорское с 1943 по 1954 годы снизился с 759 см до 101 см над нулем водомерного поста.

Морские приливы и отливы в устьевой части реки вызывают изменения уровней воды, близкие по величине к сезонным колебаниям. Приливная волна распространяется вверх по течению р. Мезень более чем на 90 км, что вызывает вымывание наносов из ее низовий. Поэтому в низовьях влияние моря определяет уровенный режим воды. Из-за высоких морских приливов и нагонов даже во время летней межени уровень р. Мезень может подниматься до отметок весеннего половодья.

Выше по течению, где влияние моря менее значительное, водный режим реки проходит в соответствие с типичным водным режимом рек Северного края: с высоким половодьем и низкой зимней и летней меженью.

В конце осени – начале зимы возможны зажорные явления, которые часто ведут к повышению уровня воды. Замерзает р. Мезень в первую очередь в верхнем течении, а затем в нижнем. Средняя дата замерзания – 9 – 12 ноября. Вскрывается река быстрее в верхнем и нижнем течении, чем в среднем.

Весной часто встречаются заторы льда на участке реки с малой величиной угла поворота и у островов. В верхнем течении заторы возникают в крутых излучинах реки неподалеку от д. Макариб, в среднем – возле островов между деревнями Большая Пысса и Латьюга, а в нижнем – у различных островов.

Середина мая является началом навигации по реке. В летний период она судоходна только в нижнем течении на расстоянии до 300 км от устья. В верхнем и среднем течениях в этот период реку можно перейти вброд [4].

1.4.2 Условия формирования максимального стока

Максимальный сток на реке Мезень формируется во время весеннего половодья и является основной фазой водного режима. Он зависит от многих факторов: геологического строения и рельефа района, величины снежного покрова, подземных вод и густоты речной сети.

На южной и юго-западной части территории начало половодья, как правило, приходится на середину апреля, в центральной – на конец апреля, а на северной и северо-восточной на начало или середину мая. Максимум весеннего половодья обычно наблюдается в начале – середине мая.

Для исследуемого района характерна длительная зима, которая формирует мощный снежный покров – именно он является главным фактором формирования половодья. По его характеристикам в дальнейшем определяется водоподача на водосбор. Его максимум наблюдается во второй половине марта. Для лесных участков он достигает 75 – 85 см, открытая местность – 55 – 75 см. На севере водосбора снег лежит в среднем 200 – 230 дней, во внутренних районах – 170 – 200 дней, а на юге – 160 – 170 дней. Процесс снеготаяния имеет затяжной характер и сопровождается дождевыми паводками.

Весеннее половодье на р. Мезени длится в течение 1,5 – 2 месяцев. В это время проходит около 50 – 70 % годового стока. Для него характерен резкий подъем и замедленный спад, на который влияет возвращение холодов и выпадение дождей, поддерживающих высокую водность во время схода снежного покрова. Из-за сложного режима стока в течение периода половодья, характеризующегося как второстепенными пиками, так и основными, связь максимальных расходов с полным объемом весеннего стока довольно слабая. Одновременно с максимумом расхода наступает наивысший уровень воды. Распределение среднего слоя стока почти повторяет распределение

снегозапасов перед началом снеготаяния. Его значение составляет около 170 мм и практически не изменяется по всей территории [5].

1.5 Исходные данные для расчетов

1.5.1 Метеорологические станции

Использованные для расчетов метеорологические данные были взяты с четырех наиболее близких к реке Мезень станций, расположенных на ее водосборе.

Данные станции относятся к Северному УГМС и расположены в двух территориальных областях: Архангельской области и Республике Коми. Ненецкий автономный округ не учитывался из-за дальнего расположения метеостанций.

В Архангельской области были выбраны метеостанции Сура ($65^{\circ}45'$ с.ш., $45^{\circ}38'$ в.д.) и Койнас ($64^{\circ}45'$ с.ш., $47^{\circ}39'$ в.д), расположенные в Пинежском и Лешуконском районах. Сура относится к погодным метеостанция типа М-2. Открыта в 1913 году. Койнас является реперной климатической станцией Росгидромета. В 2012 году получила свидетельство ВМС в связи с достижением непрерывных 100-летних рядов наблюдений.

В республике Коми данные были взяты со станций Усть-Цильма ($65^{\circ}26'$ с.ш., $52^{\circ}08'$ в.д.) и Усть-Вымь ($62^{\circ}14'$ с.ш., $50^{\circ}25'$ в.д.), расположенных в одноименных районах. Усть-Цильма работает с 1933 года и является авиационной метеостанцией. Усть-Вымь открыта в 1931 году [6].

На данный момент времени все 4 станции являются действующими.

На рисунке 1.2 и в таблице 1.1 показаны сведения о выбранных метеорологических станциях.

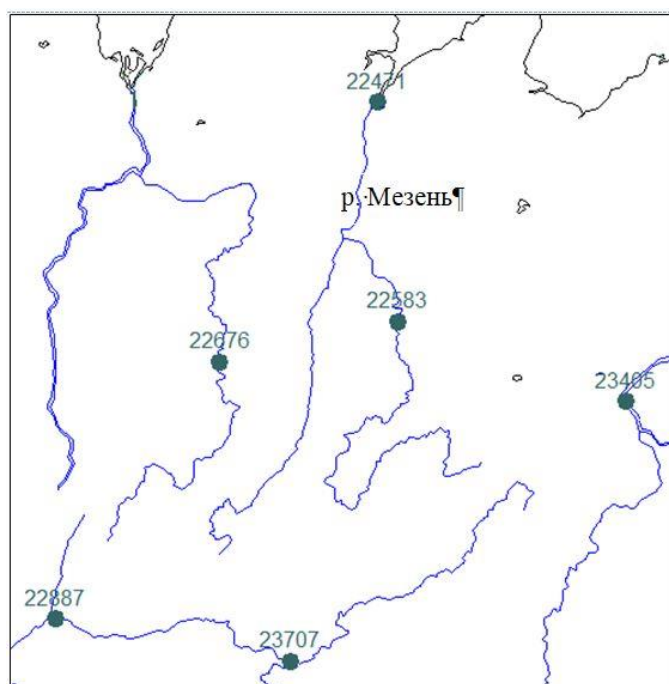


Рисунок 1.2 – Схема расположения метеостанций на водосборе р. Мезень

Таблица 1.1 – Список метеостанций и метеорологических данных

| № п/п | № станции | Станция | Характеристики | | |
|----------|-----------|-------------|----------------|-----|-----|
| | | | T, X | S | h |
| 1 | 22583 | Койнас | v | v | v |
| 2 | 22676 | Сура | v | v | v |
| 3 | 23405 | Усть-Цильма | v | v | v |
| 4 | 23707 | Усть-Вымь | v | — | v |

1.5.2. Гидрологические посты

Для расчетов гидрологические данные были взяты с поста Макариб (код 70378).

Пост находится в деревне Макариб Удорского района Республики Коми. Координаты от поста – $63^{\circ}38'$ с.ш., $49^{\circ}26'$ в.д. Относится к верхней Мезени, расстояние устья – 681 км. Отметка нуля поста – 102,85 мБс. Непрерывно работает с 1945, на данный момент является действующим.

На рисунке 1.3 показано положение гидропоста на водосборе реки Мезень.

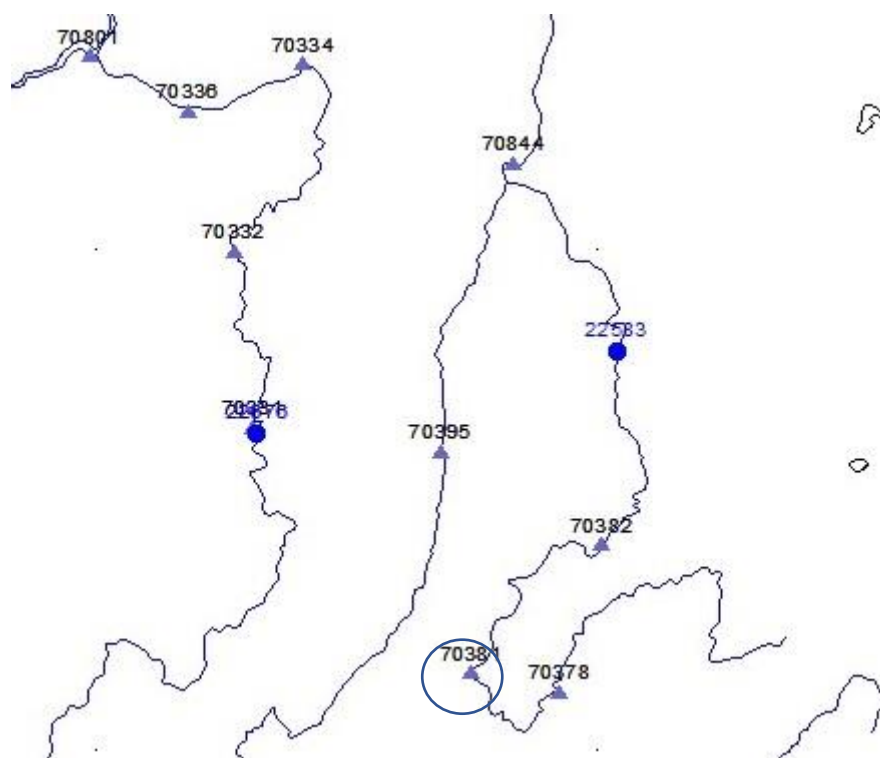


Рис.1.3 – Расположение гидропоста Макариб на водосборе р. Мезень

1.5.3. Гидрометеорологические характеристики

Для расчетов были использованы следующие метеорологические характеристики, взятые с базы данных сайта *meteo.ru* [7]:

- Ежедневные данные приземной температуры воздуха (t , °C) и осадков (X , мм), которые выступали в качестве внешних воздействий на моделируемую систему.
- Для параметризации модели использовались данные маршрутных снегомерных съемок, а именно запасы воды в снеге (S , мм).
- С помощью ежедневных значений высоты снежного покрова (h , см) с дискретностью одни сутки определялась заключительная дата расчета водоотдачи за холодный период.

Период наблюдений составил 15 лет (2006 – 2020 г.).

В качестве гидрологических характеристик были выбраны ежедневные расходы воды (Q , м³/с), взятые из базы данных АИС ГМВО [8]. Период наблюдений составил 13 лет (2008–2020 г.).

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

Математическое моделирование применяется для диагностических и прогностических задач. Точность решения зависит от качества исходных данных и степени детализации физических процессов, которые описывает модель.

Для прогнозирования гидрологических явлений необходим физический анализ процессов, обуславливающих данное явление. Выбирая метод прогнозирования, необходимо учитывать целесообразность того или иного общего подхода к решению задачи. Так метод водного баланса основан на исследовании взаимосвязи между стоком и определяющими его факторами. Он широко применяется для прогноза сезонного стока [9].

Для решения расчетной задачи и дальнейшего прогнозирования расходов на реке Мезень необходимо построить две модели и стыковать их. Это модель формирования запасов воды в снеге и модель формирования стока.

2.1 Модель формирования запасов воды в снеге

Под внешними воздействиями на модель формирования запасов воды в снеге рассматриваются ежедневные данные осадков и приземной температуры воздуха. Температура в данном случае выступает в качестве «фильтра», распределяющего твердые осадки с холодного периода на начало теплого. Модель позволяет рассчитать снегозапасы и водоотдачу из снега с дискретностью 1 сутки, поэтому ее искомой функцией становится внутригодовое распределение водоподачи на водосбор, что необходимо для дальнейшего моделирования и прогнозирования речного стока. На рисунке 2.1 представлена блок-схема рассматриваемой модели.

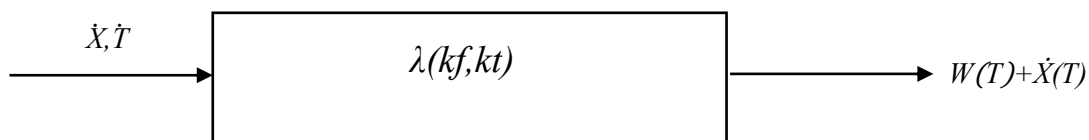


Рис.2.1 – Блок-схема модели формирования запасов воды в снеге

2.2 Методика определения устойчивого перехода температуры через 0 °C

Первым этапом исследования является определение дат начала снегонакопления на водосборе. За эту дату принимается начало устойчивого перехода температуры через 0 °C к отрицательным значениям. Устойчивый переход через 0 °C определяет дата после характерного пика (максимального значения) на графике суммы температур за холодный период. В качестве примера на рисунке 2.2 приведен хронологический график температур и сумм температур за 2017 г. для станции Сура.

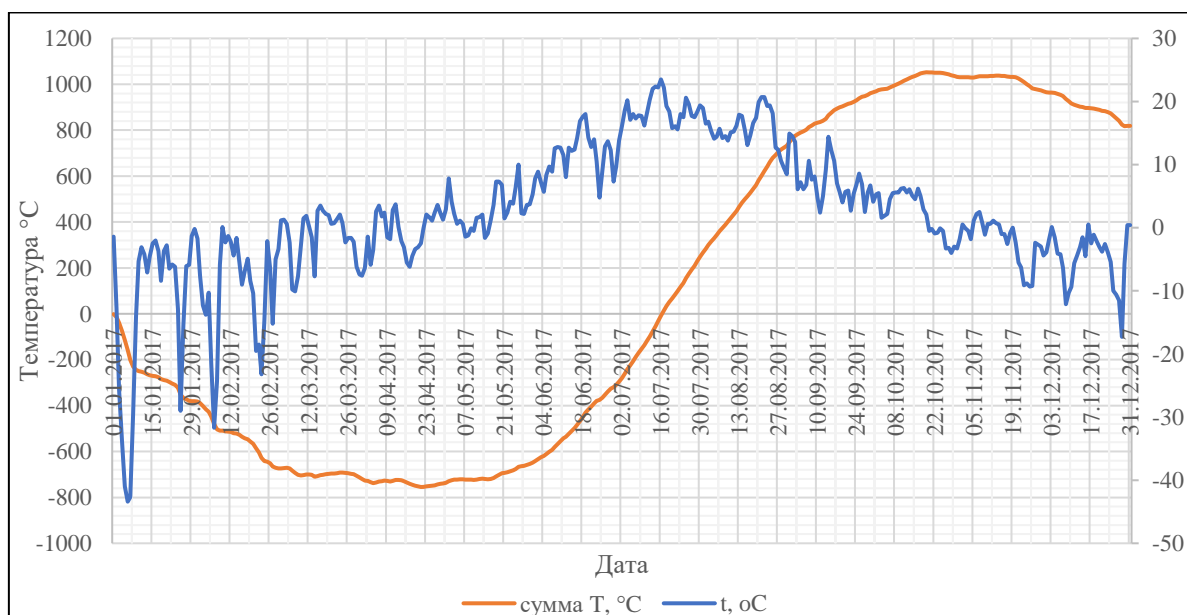


Рисунок 2.2 – Хронологический график температур и сумм температур для станции Сура за 2017 г.

2.3 Методика расчета запасов воды в снеге

Под запасами воды в снеге подразумевается содержание в снежном покрове в рассматриваемый момент времени общего количества воды в твердом или жидком виде. Расчет запасов воды в снеге является вторым этапом исследования и представляет собой сумму выпавших твердых осадков (снега) с учетом водоотдачи в период оттепелей [10].

С даты устойчивого перехода температур к устойчивым отрицательным значениям выполняется суммирование твердых осадков (X^{TB}) с коэффициентом потерь kf , минимизирующим разницу между данными снегосъемок, которые проводятся по маршруту и на метеостанции. В период оттепелей водоотдача учитывается посредством температурного коэффициента kt , показывающим сколько мм слоя снега стаивает на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ положительной температуры (t^+). Расчет заканчивается на дату полного отсутствия снега на станции, которая определяется по высоте снежного покрова равным нулю. Таким образом, элементарная модель формирования запасов воды в снеге и её конечно-разностная аппроксимация выглядят так:

$$\frac{dS}{dt} = kf \cdot X^{TB} - kt \cdot t^+ \quad (1)$$

$$S_{i+1} = S_i + kf \cdot X_i^{TB} - kt \cdot t_i^+ \quad (2)$$

2.4 Методика параметризации модели формирования запасов воды в снеге

Параметры модели kf и kt определяются известным запасам воды в снежном покрове, температуре и осадкам. Оптимизация параметров выполняется с помощью процедуры «поиска решения» *MS Excel* и системы

линейных уравнений с переопределенной матрицей [11] по специально разработанной программе.

Надстройка «поиск решения» работает с группой ячеек, которые называются ячейками переменных и используются при расчете формул в целевых ячейках. Целевая ячейка – оптимальное значение формулы, которое содержится в одной ячейке с учетом ограничений на значения в других ячейках с формулами на листе. «Поиск решения» производит расчеты таким образом, чтобы значения S расчетных и S фактических были наиболее близкими друг к другу, а сумма отклонений между ними равнялась нулю [12].

Специально разработанная программа, написанная на языке *Delphi*, путем решения обратной задачи помогает подобрать параметры каждого холодного периода, минимизируя невязку между фактическими и расчетными значениями.

2.4.1 Параметризация с данными маршрутных снегосъемок

В специально разработанную программу загружается файл с ежедневными данными осадков и приземной температуры воздуха за весь период. Далее программа производит расчет устойчивого перехода температур через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ к отрицательным значениям для всей выборки. После вычисления всех устойчивых переходов через 0 загружается файл с данными о фактических снегозапасах по материалам маршрутных снегомерных съемок. Следующим этапом указываются даты, когда фактические снегозапасы становятся нулевыми. После всех выполненных процедур программа решает обратную задачу по фактическим значениям с использованием переопределенной матрицы и выдает приближенные расчетные снегозапасы. Интерфейс программы показан на рисунке 2.3.

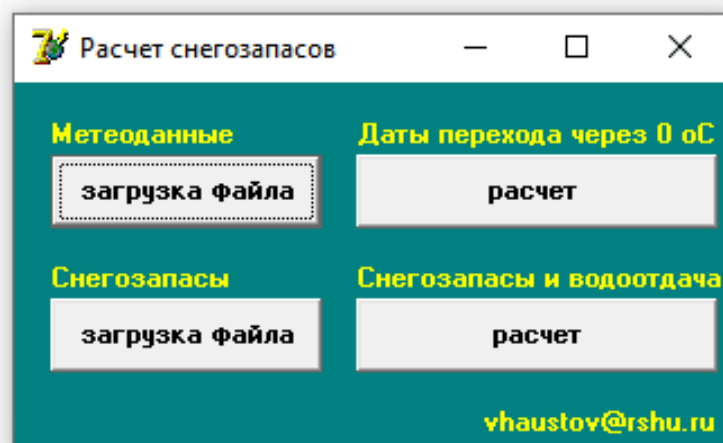


Рис.2.3 – Интерфейс программы, использованной в расчетах

2.4.2 Параметризация без данных маршрутных снеготъемок

При отсутствии фактических данных о запасах воды в снеге расчетные значения моделируются следующим образом:

- В дату устойчивого перехода температуры через 0 к отрицательным значениям рассчитанные снеготпасы принимаются равными значению осадков в этот день.
- Стартовые значения коэффициентов k_f и k_t приравниваются к 0,8 и -2,8, т.к. они наиболее близки к истине.
- По формуле с использованием k_f и k_t и учетом температуры и осадков рассчитываются снеготпасы до даты окончания залегания снега, т.е. когда высота снежного покрова равняется 0.
- Эта дата также принимается за дату нулевых фактических снеготпасов и является точкой сравнения для расчетных значений.
- Вычисляется отклонение между рассчитанными и фактическими значениями снеготпасов.

– Через процедуру «поиск решения» проводится подбор оптимальных параметров k_f и k_t таким образом, чтобы отклонение между фактическими и рассчитанными значениями снеготпасов было равно 0.

2.4.3 Оценка точности расчетов

Оценка эффективности методики прогнозирования позволяет установить возможность ее практического применения. Оценкой согласия фактических, расчетных и прогнозных значений запасов воды в снеге служит критерий S/σ [9]. S – средняя квадратическая погрешность поверочных прогнозов, вычисляемая по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n-m}} \quad (3)$$

где y_i и y'_i – фактическое и предсказанное значение;

n – число членов ряда;

m – число степеней свободы, равное числу постоянных в прогностическом уравнении.

σ – среднее квадратическое отклонение прогнозируемого значения элемента от среднего, вычисляемое по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (4)$$

где y_i – значение прогнозируемой величины;

\bar{y} (штрих) – среднее значение прогнозируемой величины;

n – число членов ряда.

Методика прогнозирования считается приемлемой, если обеспеченность допустимой погрешности поверочных прогнозов не менее чем на 10 % превышает обеспеченность вероятного отклонения от нормы [13]:

Поскольку длина (n) исследуемых рядов превышает значение 25, должно выполняться условие $S/\sigma \leq 0,8$, чтобы методика считалась эффективной.

2.5. Методика расчета водоотдачи из снега и водоподачи на водосбор

Водоотдача из снега рассчитывается как разница между смежными численными значениями запасов воды в снеге в сторону убывания.

$$W = S_{i-1} - S_i \quad (5)$$

Где W – водоотдача из снега, мм;

S_{i-1} и S_i – смежные численные значения запасов воды в снеге, мм.

Водоподача на водосбор в холодный период учитывается водоотдачей из снега и осадками, а в теплый – непосредственно осадками. Холодный период:

$$X = W + \dot{X} \quad (6)$$

где X – водоподача на водосбор, мм;

\dot{X} – осадки, мм.

Теплый период:

$$X = \dot{X} \quad (7)$$

В проведенном исследовании не рассматривались испарение и потери на инфильтрацию.

2.6 Модель формирования стока

В исследовании рассматривается модель формирования стока первого порядка. В качестве внешних воздействий на данную модель выступает водоподача на водосбор, параметрами модели являются k (коэффициент стока) и τ (время добегания), а искомой функцией – расходы воды, изменяющиеся во времени:

$$\tau \frac{dQ}{dt} + Q = k(\dot{x} + \dot{w}), \quad (8)$$

Где τ – время добегания, сут;

Q – расход воды, м³/с;

K – коэффициент стока;

$\dot{x} + \dot{w}$ – водоподача на водосбор, мм.

На рисунке 2.4 изображена блок-схема рассматриваемой модели.

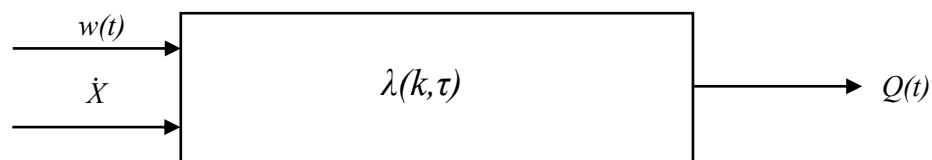


Рис.2.4 – Блок-схема модели формирования стока

2.7 Особенности моделирования процесса формирования стока в зимний период

Особенностью моделирования процесса формирования стока в зимний период является использование степенной модели, показывающей убывание расходов воды по времени. Истощение стока рассчитывается с первого дня первого месяца каждого года до даты, когда фактический расход в период зимней межени является минимальным. Скорость истощения прямым образом зависит от снегозапасов и значения стартового расхода воды. Формула для расчета выглядит следующим образом:

$$Q = an^b \quad (9)$$

Где Q – расход воды, м³/с;

A, b – параметры степенной связи;

t – порядковый номер дня.

3 СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА

3.1 Определение устойчивого перехода температуры через 0 °С

Устойчивый переход температуры через 0 °С рассчитывался для каждого года с помощью специально разработанной программы по фактическим данным температур за период наблюдений с 2006 по 2020 г. В таблице 3.1 представлены даты устойчивых переходов для метеостанций Койнас, Сура, Уть-Цильма и Усть-Вымь.

Таблица 3.1 – Даты устойчивых переходов температуры через 0 °С для рассматриваемых метеостанций

| МС Койнас | | | |
|----------------|---------------------------|------|---------------------------|
| Год | Дата устойчивого перехода | Год | Дата устойчивого перехода |
| 2006 | 14.10.2006 | 2014 | 19.10.2014 |
| 2007 | 03.11.2007 | 2015 | 24.10.2015 |
| 2008 | 17.11.2008 | 2016 | 20.10.2016 |
| 2009 | 25.10.2009 | 2017 | 20.10.2017 |
| 2010 | 06.11.2010 | 2018 | 25.10.2018 |
| 2011 | 04.11.2011 | 2019 | 18.10.2019 |
| 2012 | 24.10.2012 | 2020 | 10.11.2020 |
| 2013 | 14.10.2013 | | |
| МС Сура | | | |
| Год | Дата устойчивого перехода | Год | Дата устойчивого перехода |
| 2006 | 14.10.2006 | 2014 | 11.10.2014 |
| 2007 | 04.11.2007 | 2015 | 07.11.2015 |
| 2008 | 17.11.2008 | 2016 | 24.10.2016 |
| 2009 | 23.10.2009 | 2017 | 20.10.2017 |
| 2010 | 06.11.2010 | 2018 | 24.10.2018 |
| 2011 | 04.11.2011 | 2019 | 27.10.2019 |
| 2012 | 24.10.2012 | 2020 | 10.11.2020 |
| 2013 | 15.11.2013 | | |
| МС Усть-Цильма | | | |
| Год | Дата устойчивого перехода | Год | Дата устойчивого перехода |
| 2006 | 09.10.2006 | 2014 | 10.10.2014 |
| 2007 | 03.11.2007 | 2015 | 05.10.2015 |
| 2008 | 02.11.2008 | 2016 | 26.10.2016 |
| 2009 | 24.10.2009 | 2017 | 20.10.2017 |
| 2010 | 28.10.2010 | 2018 | 19.10.2018 |
| 2011 | 24.10.2011 | 2019 | 17.10.2019 |

| | | | |
|--------------|---------------------------|------|---------------------------|
| 2012 | 25.10.2012 | 2020 | 15.10.2020 |
| 2013 | 13.10.2013 | | |
| МС Усть-Вымь | | | |
| Год | Дата устойчивого перехода | Год | Дата устойчивого перехода |
| 2006 | 14.10.2006 | 2014 | 11.10.2014 |
| 2007 | 04.11.2007 | 2015 | 07.10.2015 |
| 2008 | 18.11.2008 | 2016 | 23.10.2016 |
| 2009 | 23.10.2009 | 2017 | 20.10.2017 |
| 2010 | 16.11.2010 | 2018 | 27.10.2018 |
| 2011 | 25.10.2011 | 2019 | 28.10.2019 |
| 2012 | 23.10.2012 | 2020 | 10.11.2020 |
| 2013 | 15.11.2013 | | |

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что переход к устойчивым отрицательным значениям на рассматриваемой территории наблюдается в октябре – ноябре.

На рисунке 3.1 для визуализации устойчивого перехода через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ к отрицательным значениям показан хронологический график хода температур и сумм температур на примере станции Койнас за 2009 год. Максимальное значение суммы температур ($595,2$) соответствует дате $24.10.2009$ г. Следующая дата после данного характерного пика на графике является датой устойчивого перехода к отрицательным значениям температур ($25.10.2009$).

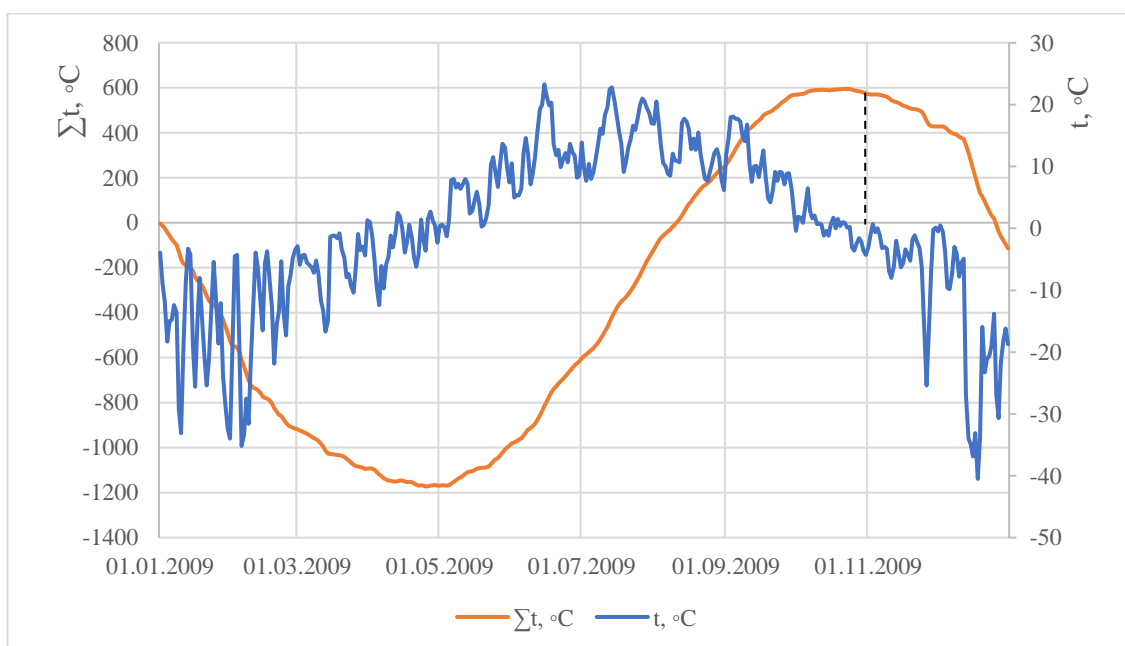


Рисунок 3.1 – Хронологический график хода температур и сумм температур для метеостанции Койнас за 2009 г.

Данный график построен путем суммирования температур за 2009 г. вручную в программе *MS Excel*. Специально разработанная программа позволяет сделать это намного быстрее, не требуя построения хронологических графиков.

Для моделирования процесса формирования стока также требовалось определение устойчивого перехода температуры через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ к отрицательным значениям, кроме того, определялся и устойчивый переход к положительным значениям. Для этого температуры по всем 4-ем метеостанциям осреднялись, и новая выборка использовалась для дальнейших расчетов. В приложении А указаны графики годового хода температур и сумм температур для гидропоста Макариб за период с 2008 по 2020 г.

3.2 Расчет запасов воды в снеге

3.2.1 Параметризация модели формирования запасов воды в снеге

Параметризация и дальнейший расчет запасов воды в снеге для метеостанций Сура, Усть-Цильма и Койнас, где есть фактические данные измеренных запасов воды в снеге по материалам маршрутных снегомерных съемок, проводились в специально разработанной программе. В таблицах 3.2 – 3.4 представлены значения коэффициентов k_f и k_t , полученных с помощью программы за период с 2007 по 2020 г. На рисунках 3.2 – 3.4 изображены графики хода параметров за данный период.

Таблица 3.2 – Параметры, полученные для станции Сура

| Год | Число снегосъемок | Параметр k_f | Параметр k_t |
|------|----------------------|-------------------|-------------------|
| 2007 | 15 | 0,72 | -2,03 |
| 2008 | 22 | 0,97 | -2,41 |
| 2009 | 24 | 0,86 | -3,25 |
| 2010 | 22 | 0,78 | -1,94 |
| 2011 | 20 | 0,83 | -3,52 |
| 2012 | 21 | 0,93 | -3,23 |
| 2013 | 22 | 0,71 | -3,12 |
| 2014 | 20 | 0,79 | -1,93 |
| 2015 | 19 | 1,15 | -1,95 |
| 2016 | 17 | 0,84 | -1,91 |
| 2017 | 24 | 1,02 | -3,27 |
| 2018 | 23 | 0,94 | -3,3 |
| 2019 | 21 | 0,87 | -2,25 |
| 2020 | 23 | 0,93 | -2,98 |

Таблица 3.3 – Параметры, полученные для станции Усть-Цильма

| Год | Число снегосъемок | Параметр k_f | Параметр k_t |
|------|----------------------|-------------------|-------------------|
| 2007 | 18 | 1,02 | -3,68 |
| 2008 | 28 | 1,06 | -3,29 |
| 2009 | 26 | 1,11 | -3,53 |
| 2010 | 23 | 1,09 | -2,61 |
| 2011 | 21 | 1,24 | -3,53 |
| 2012 | 22 | 1,09 | -4,56 |
| 2013 | 22 | 0,84 | -2,74 |
| 2014 | 21 | 0,88 | -3,18 |
| 2015 | 24 | 0,8 | -1,87 |
| 2016 | 25 | 0,73 | -1,76 |
| 2017 | 29 | 1,26 | -4,13 |
| 2018 | 27 | 0,88 | -3,21 |
| 2019 | 26 | 0,89 | -2,73 |
| 2020 | 26 | 0,99 | -3,22 |

Таблица 3.4 – Параметры, полученные для станции Койнас

| Год | Число снегосъемок | Параметр k_f | Параметр k_t |
|------|----------------------|-------------------|-------------------|
| 2007 | 16 | 0,78 | -1,67 |

| | | | |
|------|----|------|-------|
| 2008 | 23 | 0,93 | -2,2 |
| 2009 | 21 | 0,94 | -2,46 |
| 2010 | 18 | 0,87 | -1,65 |
| 2011 | 18 | 0,78 | -2,32 |
| 2012 | 18 | 0,9 | -2,41 |
| 2013 | 20 | 0,83 | -2,45 |
| 2014 | 22 | 0,92 | -2,09 |
| 2015 | 19 | 0,96 | -1,72 |
| 2016 | 18 | 0,95 | -1,61 |
| 2017 | 25 | 1,02 | -2,49 |
| 2018 | 21 | 0,92 | -2,36 |
| 2019 | 20 | 0,87 | -1,87 |
| 2020 | 21 | 0,91 | -2,26 |

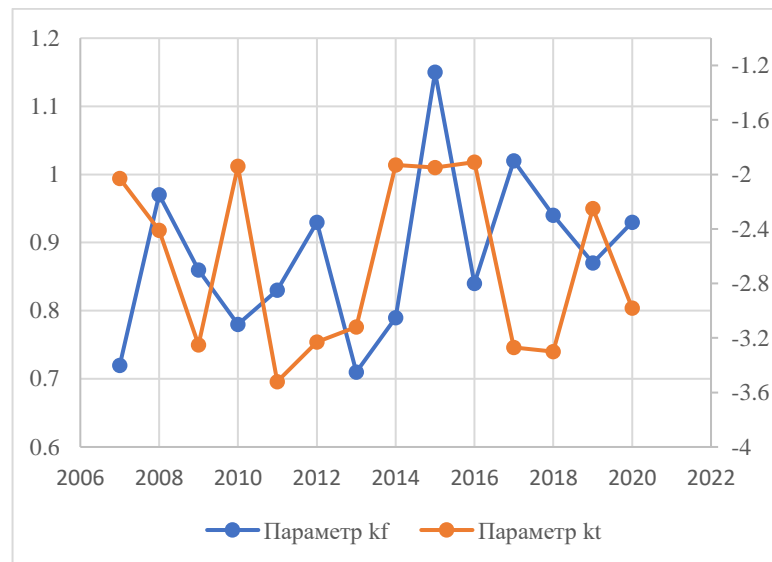


Рисунок 3.2 – Хронологический ход параметров для станции Сура с 2007 по 2020 г.

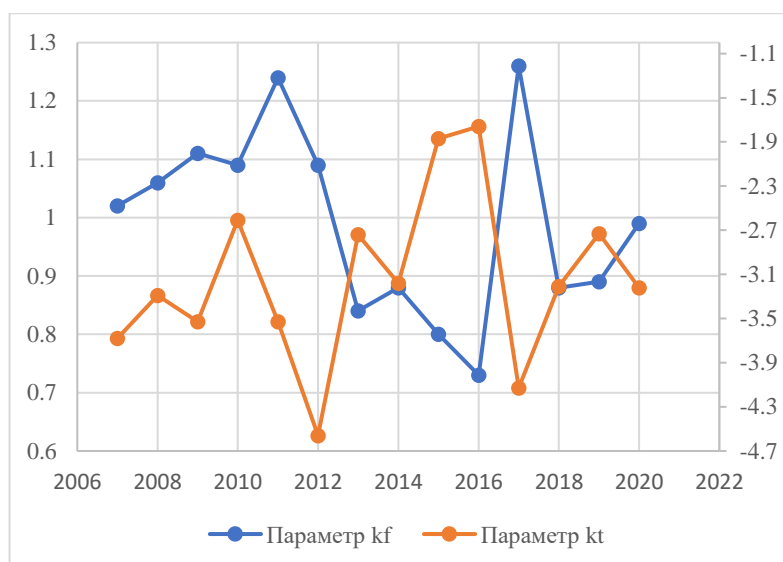


Рисунок 3.3 – Хронологический ход параметров для станции Усть-Цильма с 2007 по 2020 г.

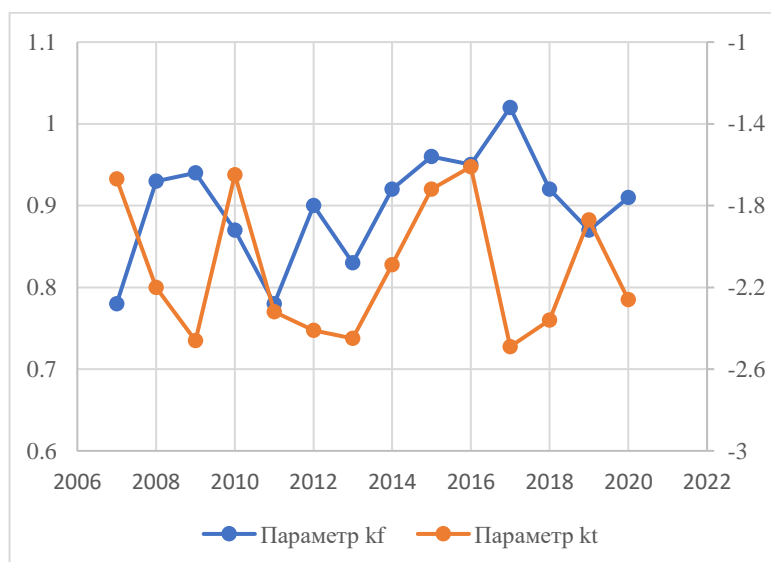


Рисунок 3.4 – Хронологический ход параметров для станции Койнас с 2007 по 2020 г.

Для метеостанции Усть-Вымь, где отсутствовали фактические данные снеготпасов, параметризация была выполнена с помощью надстройки *MS Excel* «Поиск решения», а расчетные снеготпасы получены по формуле (1). В таблице 3.5 указаны коэффициенты k_f и k_t , а на рисунке 3.5 – их хронологический ход за период 2007 – 2020 г.

Таблица 3.5 – Параметры, полученные для станции Усть-Вымь

| Год | Число снегосъемок | Параметр k_f | Параметр k_t |
|------|----------------------|-------------------|-------------------|
| 2007 | 0 | 0,82 | -2,64 |
| 2008 | 0 | 0,91 | -2,26 |
| 2009 | 0 | 0,97 | -2,05 |
| 2010 | 0 | 0,79 | -2,75 |
| 2011 | 0 | 0,85 | -2,51 |
| 2012 | 0 | 0,77 | -2,79 |
| 2013 | 0 | 0,82 | -2,53 |
| 2014 | 0 | 0,91 | -1,9 |
| 2015 | 0 | 0,73 | -2,94 |
| 2016 | 0 | 0,77 | -2,82 |
| 2017 | 0 | 0,84 | -2,61 |
| 2018 | 0 | 0,84 | -2,61 |
| 2019 | 0 | 0,86 | -2,51 |
| 2020 | 0 | 0,92 | -2,13 |

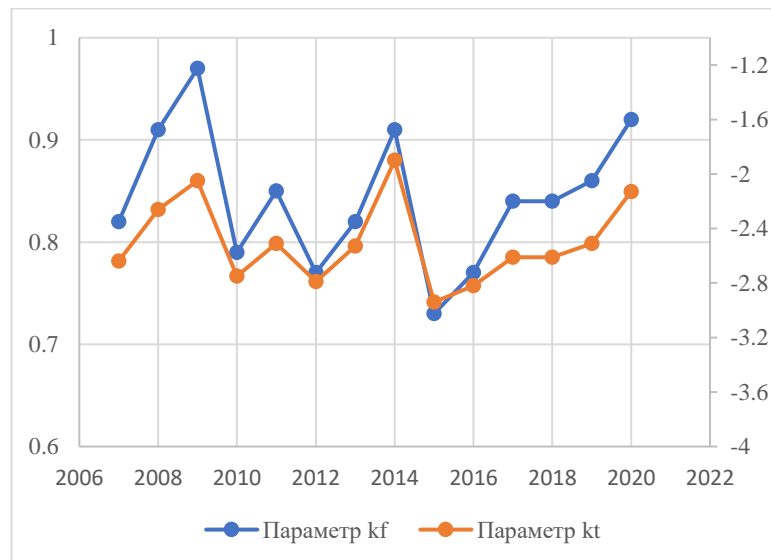


Рисунок 3.5 – Хронологический ход параметров для станции Усть-Вымь с 2007 по 2020 г.

В таблице 3.6 указаны оценки эффективности методики по критерию S/σ , вычисленного по формулам (3 – 4). Все значения критерия не превышают 0,8, что показывает высокую эффективность методики.

Таблица 3.6 – Оценка эффективности методики по критерию S/σ для метеостанций.

| Название метеостанции | S/σ | Эффективность |
|-----------------------|------------|---------------|
| Сура | 0,12 | + |
| Усть-Цильма | 0,12 | + |
| Койнас | 0,11 | + |

Запасы воды в снеге рассчитывались по формуле (2). В приложении Б представлены графики сравнения их фактических и рассчитанных значений.

3.2.2 Оценка прогноза формирования запасов воды в снеге на независимом материале

Для оценки прогноза формирования запасов воды в снеге была выбрана метеостанция Сура. Коэффициенты k_f и k_t за период разработки методики (2007 – 2018 г.) были осреднены ($k_f = 0,88$ $k_t = -2,66$) и использованы для проверки на период 2019 – 2020 г. по формуле (2). На рисунках 3.6 – 3.7 изображены графики сравнения рассчитанных запасов воды в снеге при разработке методики (параметризации) за 2007 – 2018 г. и проверке на независимом материале за 2019 – 2020 г.

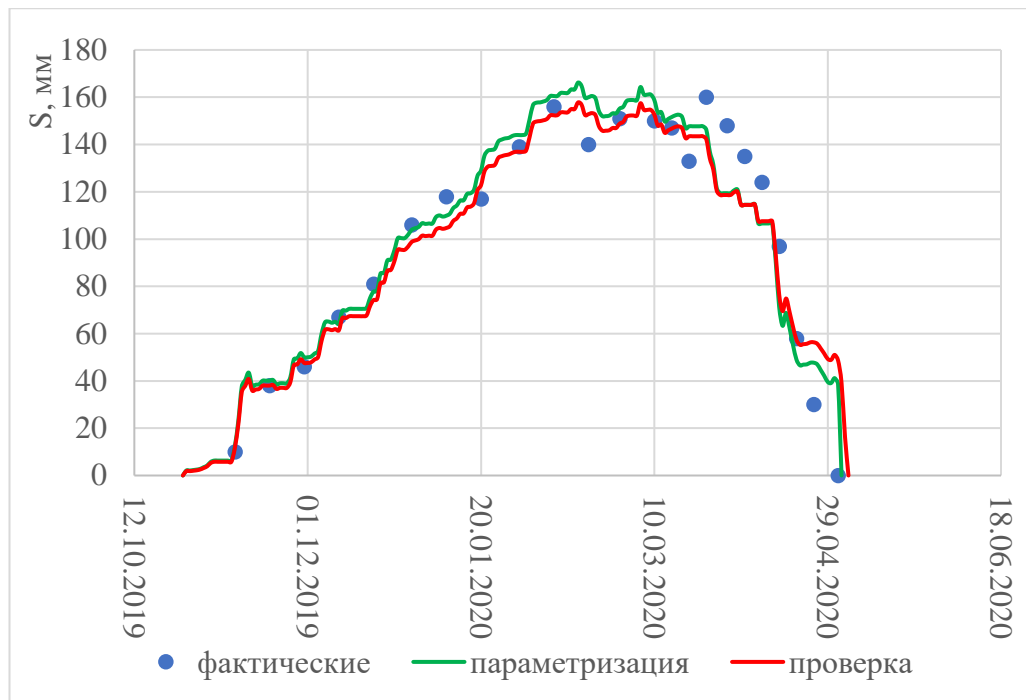


Рисунок 3.6 – Сравнение запасов воды в снеге при параметризации и проверке за 2019 г. по станции Сура

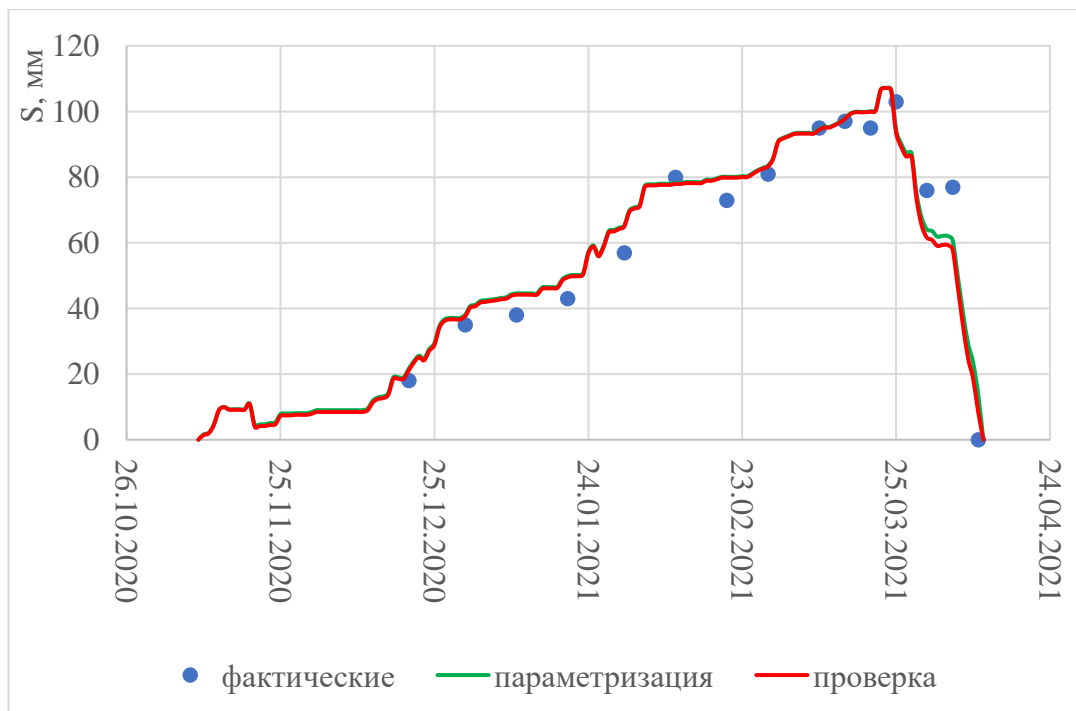


Рисунок 3.7 – Сравнение запасов воды в снеге при параметризации и проверке за 2020 г. по станции Сура

Эффективность методики (S/σ) при проверке составила 0,27. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что методика является эффективной ($0,27 < 0,8$). Значения рассчитанных снегозапасов при параметризации и проверке на независимом материале практически идентичны, а графики их хода совпадают.

3.2.3 Оценка результатов моделирования процесса формирования запасов воды в снеге при наличии данных маршрутных снегоъемок и их отсутствии

Чтобы убедиться в точности моделирования процесса формирования запасов воды в снеге на станции Усть-Вымь, где отсутствовали фактические данные снегомерных съемок, была проведена проверка по станции Койнас. Сравнивались смоделированные снегозапасы и рассчитанные снегозапасы при отсутствии и наличии фактических данных. В таблице 3.7 показано сравнение максимальных значений рассчитанных снегозапасов по выборке 2007 – 2020 г. с наличием и отсутствием фактических данных.

Таблица 3.7– Сравнение максимальных смоделированных и рассчитанных снегозапасов по станции Койнас

| год | S _{макс} | S' _{макс} | $\Delta S, \%$ |
|------|-------------------|--------------------|----------------|
| 2006 | 172 | 139 | -19% |
| 2007 | 193 | 149 | -23% |
| 2008 | 155 | 137 | -11% |
| 2009 | 124 | 130 | 5% |
| 2010 | 120 | 130 | 8% |
| 2011 | 129 | 124 | -3% |
| 2012 | 173 | 169 | -3% |
| 2013 | 155 | 123 | -21% |
| 2014 | 169 | 75 | -56% |
| 2015 | 164 | 154 | -6% |
| 2016 | 214 | 175 | -18% |

| | | | |
|------|-----|-----|------|
| 2017 | 201 | 180 | -11% |
| 2018 | 164 | 171 | 5% |
| 2019 | 263 | 251 | -5% |
| 2020 | 132 | 136 | 2% |

Среднее отклонение составило -10%, это значит, что параметризация без данных о фактических значениях запасов воды в снеге может давать заниженные значения максимальных снегозапасов. На рисунке 3.8 изображен график сравнения снегозапасов.

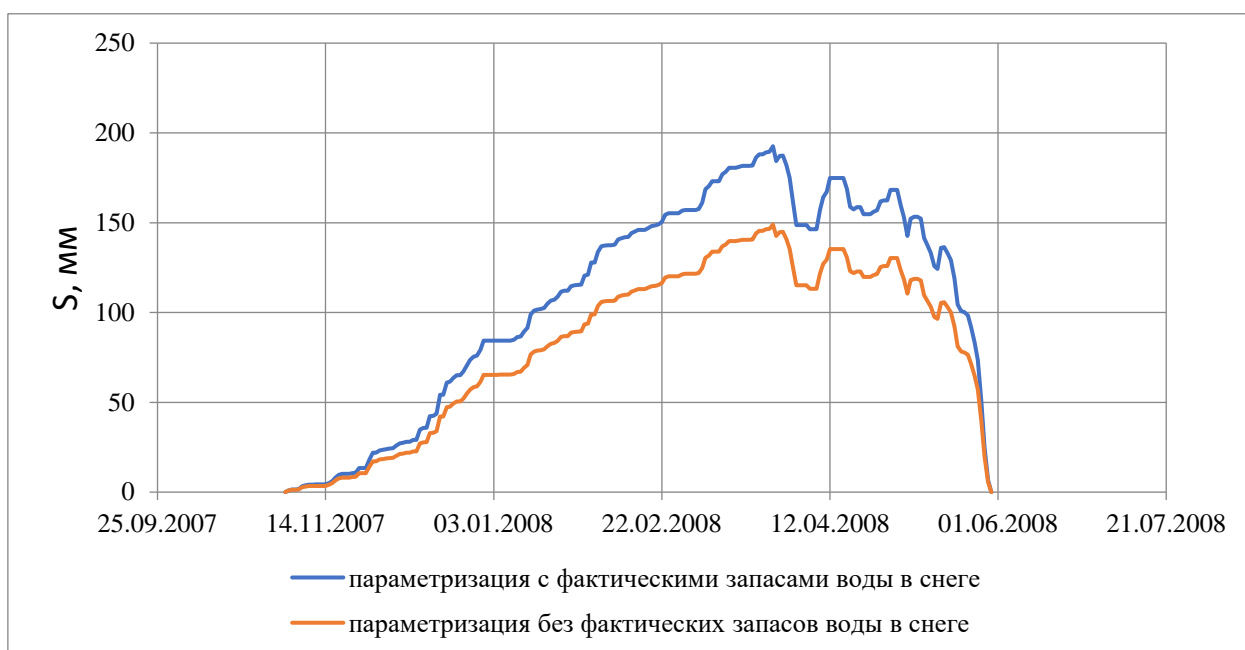


Рисунок 3.8 – Сравнение запасов воды в снеге при параметризации с фактическими данными и их отсутствии на примере 2007 года для метеостанции Койнас

3.2.4 Расчет водоотдачи и водоподачи на водосбор

Расчет водоотдачи и водоподачи на водосбор выполнялся по формулам (5 – 7). Полученные значения водоподачи за каждый год по 4-ем метеостанциям осреднялись, из мм переводились в м³/с и использовались для дальнейшего моделирования процесса формирования стока. На рисунке 3.9

изображен хронологический график хода фактических расходов воды и водоподачи на водосбор за 2008 год по гидропосту Макариб.

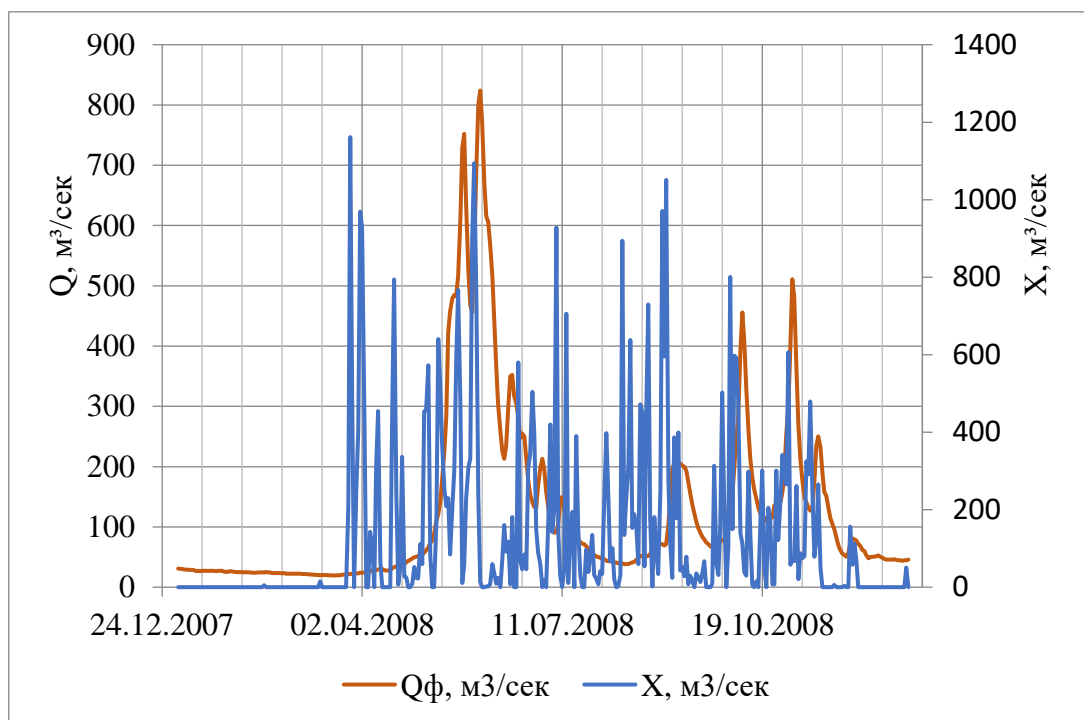


Рисунок 3.9 – Хронологический график хода фактических расходов воды и водоподачи на водосбор за 2008 год по гидропосту Макариб

Анализируя рисунок 3.9, видно, что пики графика расходов воды совпадают с пиками графика водоподачи на водосбор.

В приложении В представлены графики хронологического хода фактических расходов воды и водоподачи на водосбор за период 2009 – 2020 г.

3.3 Моделирование процесса формирования стока

3.3.1 Холодный период

В холодный период было смоделировано истощение меженного стока. Расчет начинался 1 января каждого года с 2008 по 2020 год, а заканчивался на дату, когда значение фактического расхода воды становилось минимальным. Для прогноза использовалось уравнение вида $ax^2 + bx + c$ (полином 2-ой степени), полученное по зависимости $(Q\phi) = f(n)$. В данное уравнение вместо x подставлялся порядковый номер дня за период истощения стока. На рисунках 3.10 – 3.11 в качестве примера изображены зависимость вида $(Q\phi) = f(n)$, аппроксимированная полиномом 2-ой степени, и сравнение фактических значений расходов воды с прогнозными за 2008 год по гидропосту Макариб.

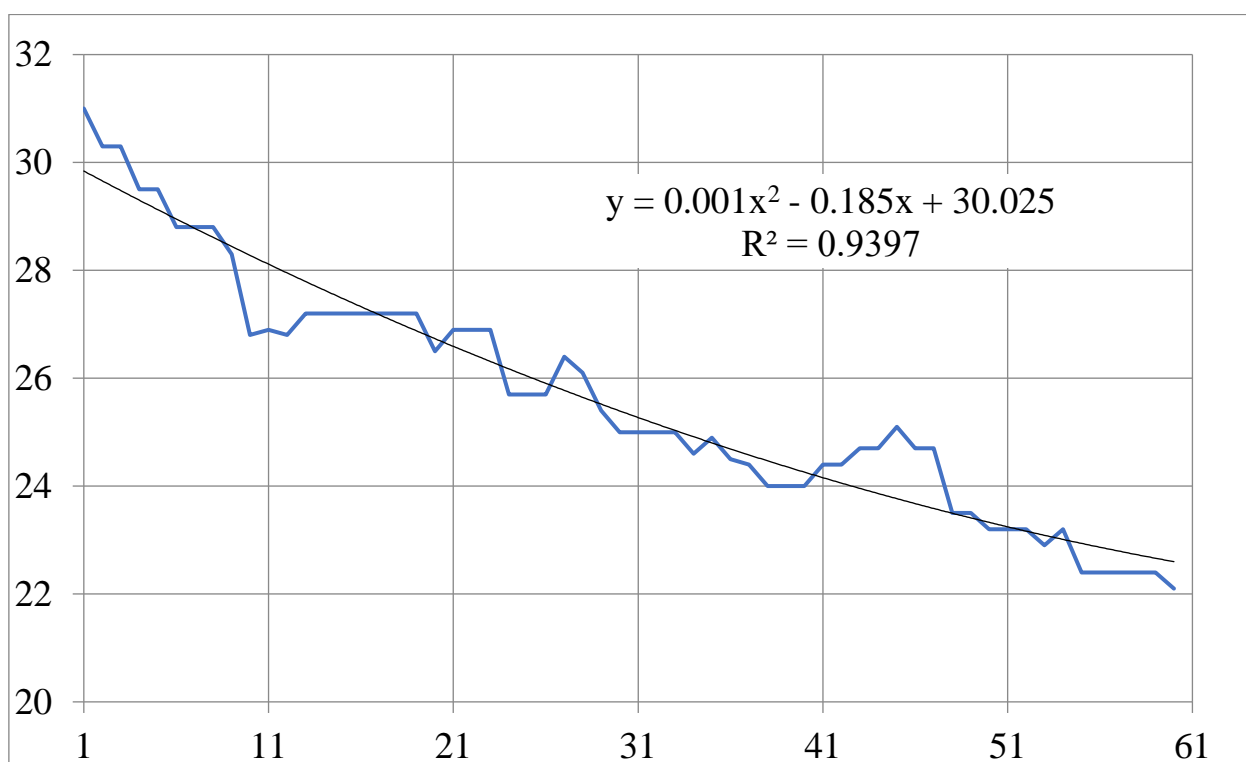


Рисунок 3.10 – Полином 2-ой степени для аппроксимации зависимости $(Q\phi) = f(n)$ за 2008 г. по гидропосту Макариб

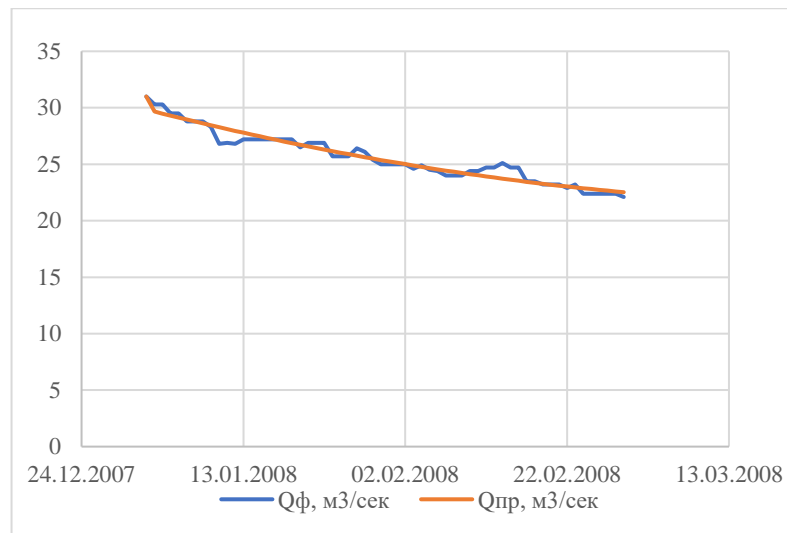


Рисунок 3.11 – Сравнение фактических и прогнозных значений расходов за 2008 год по гидропосту Макариб

Ежедневное истощение влагозапасов за меженный период рассчитывалось по степенной зависимости (9) для фактических и прогнозных значений расходов воды. На рисунке 3.12 – 3.13 изображены графики зависимости $(Qф; Qпр) = f(n)$ за 2020 г. по гидропосту Макариб.

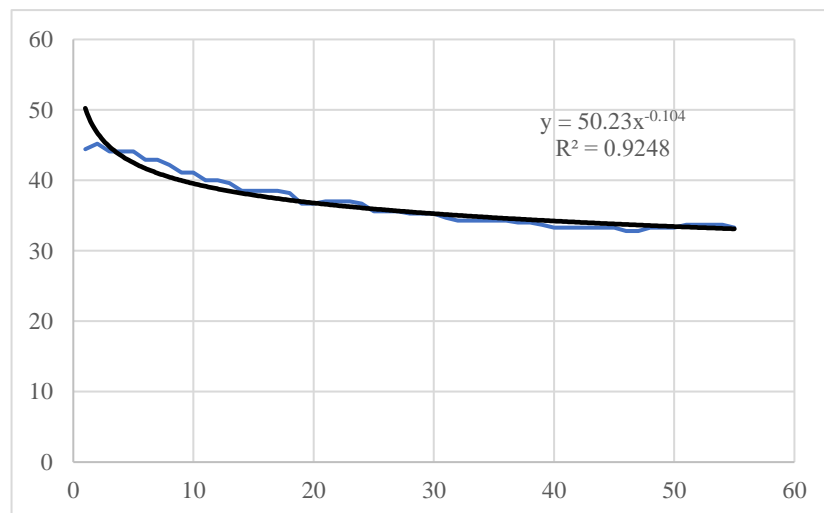


Рисунок 3.12 – график зависимости $(Qф) = f(n)$ за 2020 г. по гидропосту Макариб

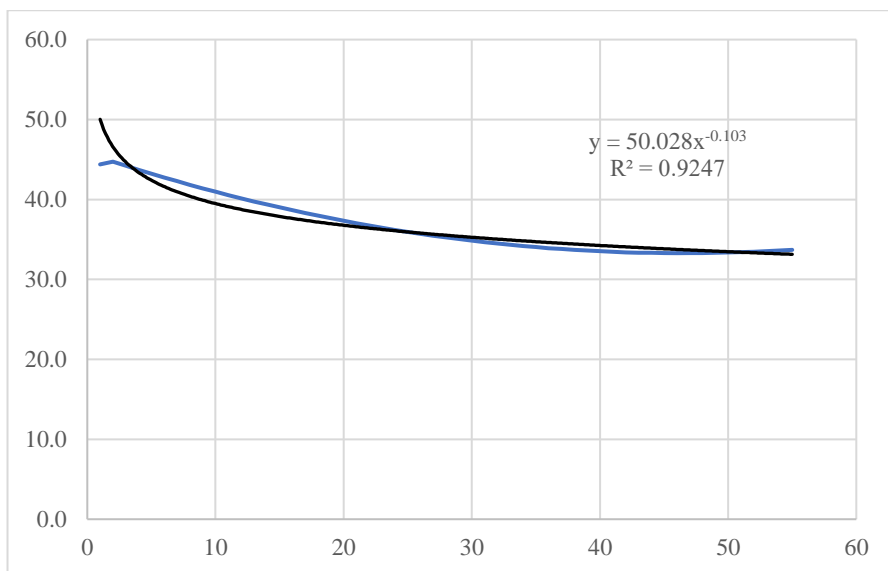


Рисунок 3.13 – график зависимости $(Q_{np}) = f(n)$ за 2020 г. по гидропосту Макариб

С помощью уравнений, полученных при построении графиков зависимости $(Q_{ф}; Q_{np}) = f(n)$ для каждого года в период с 2008 по 2020 г., были определены параметры степенной связи a и b . На рисунках 3.14 – 3.17 изображены графики зависимости параметров степенной связи от стартовых значений расходов воды.

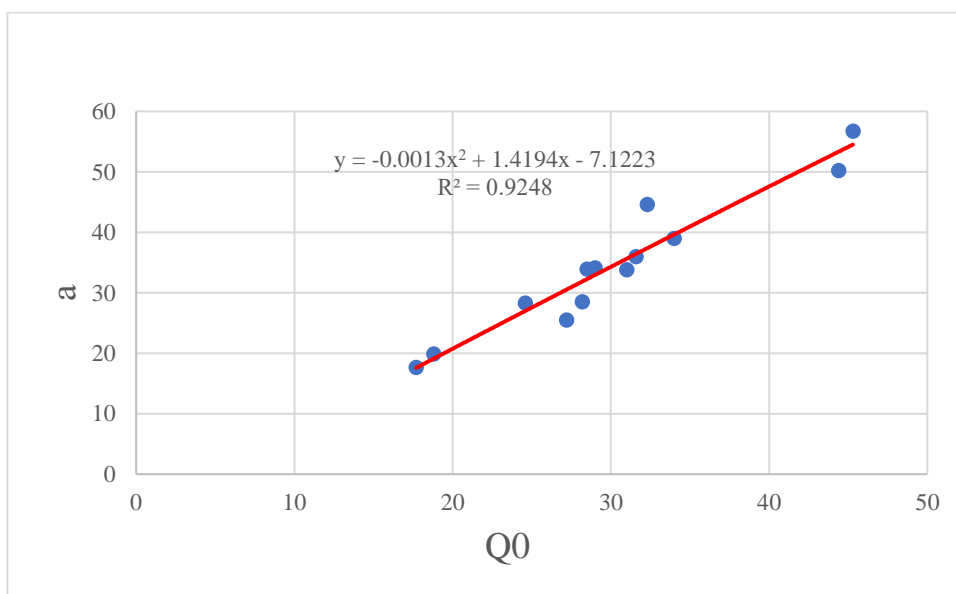


Рисунок 3.14 – График связи степенного параметра a от стартовых значений фактических расходов воды за период 2008 – 2020 г.

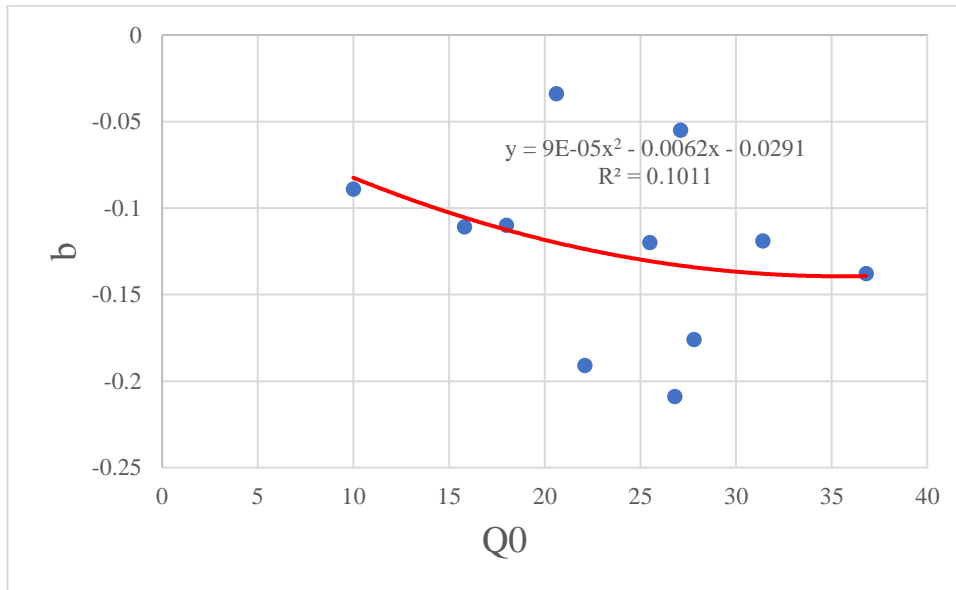


Рисунок 3.15 – График связи степенного параметра b от стартовых значений фактических расходов воды за период 2008 – 2020 г.

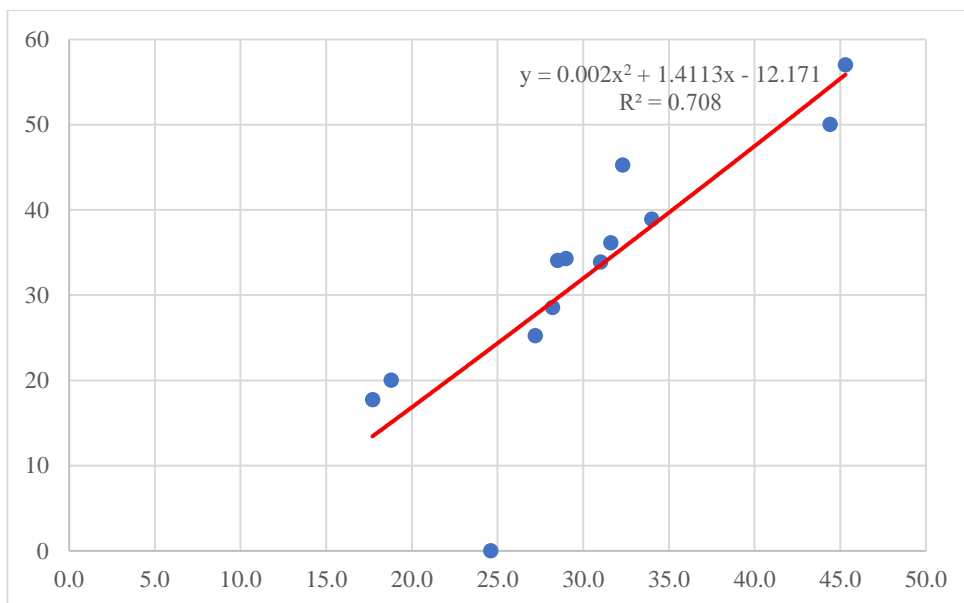


Рисунок 3.16 – График связи степенного параметра a от стартовых значений прогнозных расходов воды за период 2008 – 2020 г.

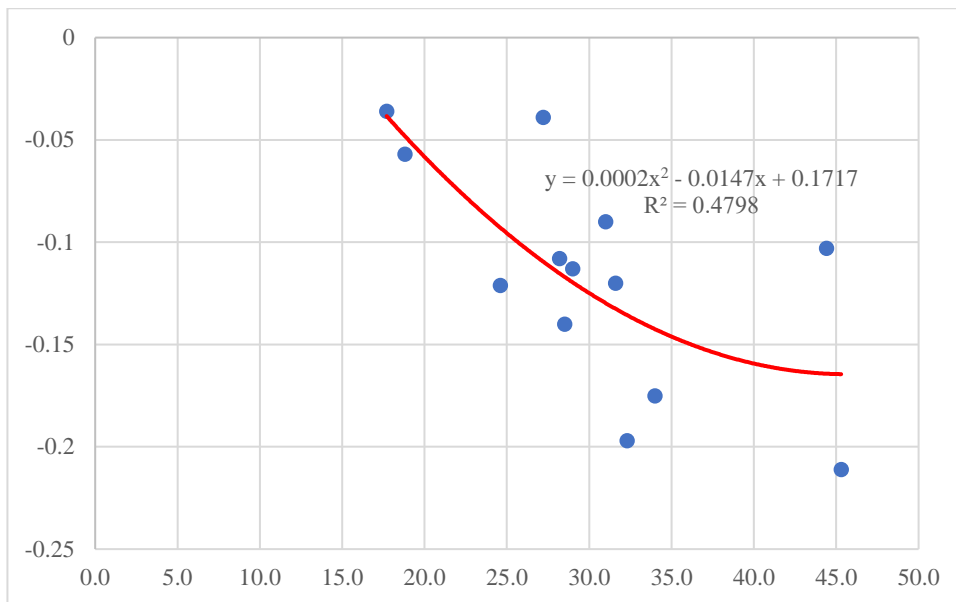


Рисунок 3.17 – График связи степенного параметра b от стартовых значений прогнозных расходов воды за период 2008 – 2020 г.

За весь период наблюдений были построены пучки истощения стока.

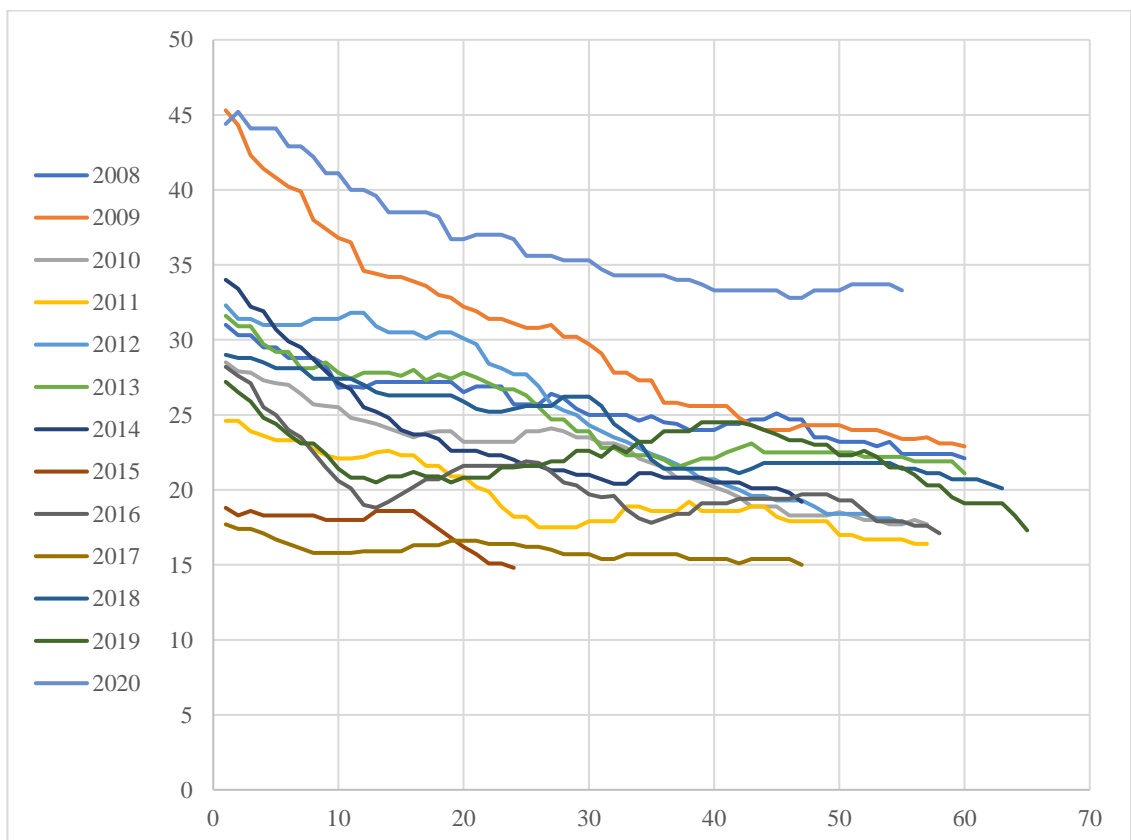


Рисунок 3.18 – Пучки фактических расходов воды за период 2008 – 2020

Г.

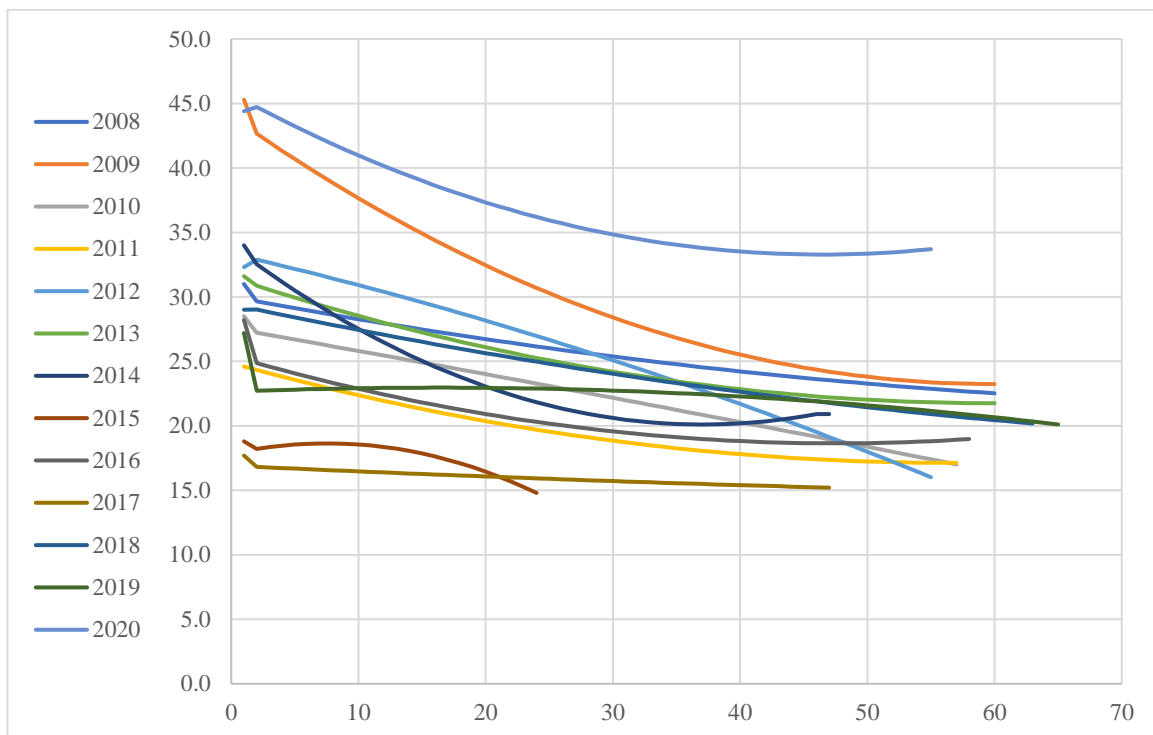


Рисунок 3.19 – Пучки прогнозных расходов воды за период 2008 – 2020

Г.

3.3.2 Теплый период

Для теплого периода моделировался максимальный сток. За дату начала расчета был выбран переход температуры через 0 к устойчивым положительным значениям. Заканчивался расчет на дату перед первым характерным пиком водоподачи на гидрографе. Прогнозные значения расходов воды рассчитывались по формуле (8) без корректировки (рисунок 3.20). Оптимальные параметры k и T определялись с помощью надстройки MS Excel «Поиск решения». К сожалению, при данном методе моделирования достичь оптимальных параметров, соответствующих физической сущности процесса не удалось – значение k получалось завышенным, либо превышало 1. Критерий S/σ показывал на неэффективность методики. Результаты представлены на рисунке 3.21.

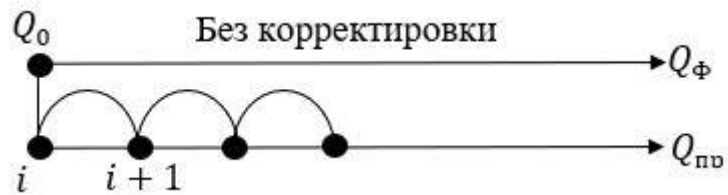


Рисунок 3.20 – Схема прогноза без корректировки (только в рамках прогнозных значений расходов воды)

Для получения эффективной методики расчета было выбрано использование корректировки – прогноз проводился в рамках фактических значений расходов воды по схеме, изображенной на рисунке 3.21. В таком случае прогноз может даваться с высокой точностью, но лишь на пару дней.



Рисунок 3.21 – Схема прогноза с использованием корректировки

3.3.3 Параметризация модели формирования речного стока

Параметризация проводилась для периода 2008 – 2020 годов с помощью надстройки в *MS Excel* «Поиск решения». В таблице 3.8 указаны полученные значения параметров k и \square за весь период наблюдений. На рисунке 3.22 показано сравнение фактических и прогнозных значений расходов воды за 2008 год по гидропосту Макариб.

Таблица 3.8 – Значения оптимальных параметров k и τ

| Год | k | τ |
|------|------|--------|
| 2008 | 0.80 | 16 |
| 2009 | 0.23 | 7 |
| 2010 | 0.08 | 10 |
| 2011 | 0.15 | 12 |
| 2012 | 0.07 | 15 |
| 2013 | 0.11 | 20 |
| 2014 | 0.19 | 21 |
| 2015 | 0.20 | 12 |
| 2016 | 0.12 | 14 |
| 2017 | 0.68 | 16 |
| 2018 | 0.37 | 14 |
| 2019 | 0.27 | 19 |
| 2020 | 0.46 | 14 |

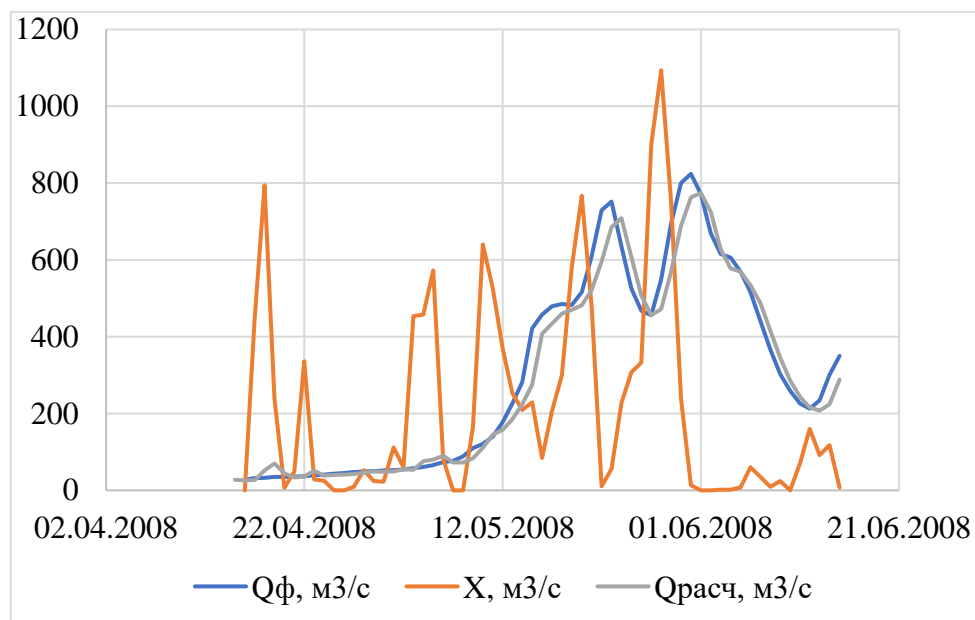


Рисунок 3.22 – Сравнение фактических и прогнозных расходов по гидропосту Макариб за 2008 год

В приложении Г указаны графики сравнения фактических и прогнозных расходов воды по гидропосту Макариб с 2009 по 2020 г.

3.3.4 Оценка прогноза речного стока на независимом материале

Оценка прогноза речного стока на независимом материале проводилась для 2019 – 2020 года по средним значениям параметров k и T за период разработки методики (2008 – 2018 г.). На рисунках 3.23 – 3.24 представлены графики сравнения фактических расходов воды, расходов при параметризации и расходов при проверке методики.

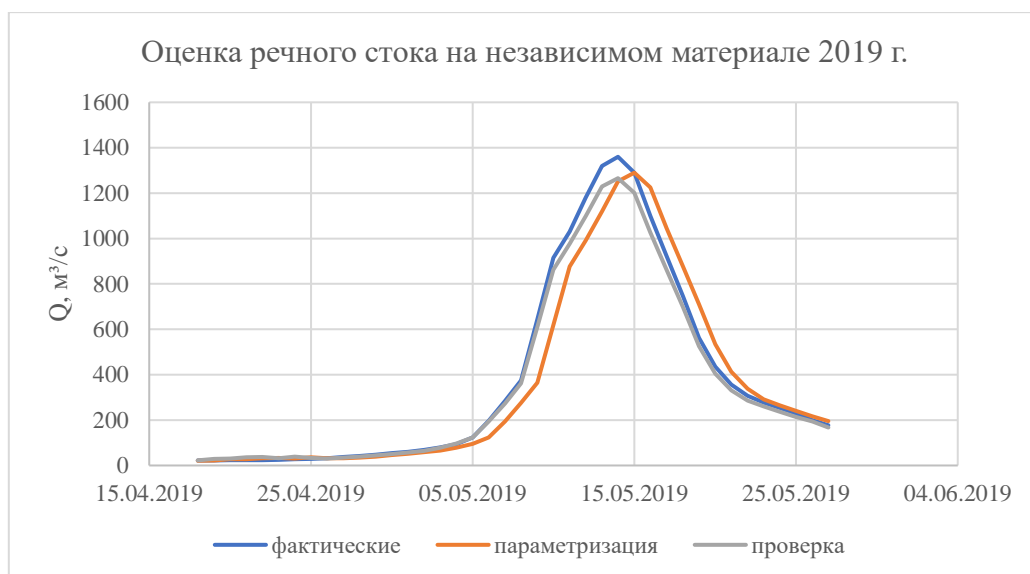


Рисунок 3.23 – График сравнения по 2019 году



Рисунок 3.24 – График сравнения по 2020 году

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы были выполнены следующие задачи:

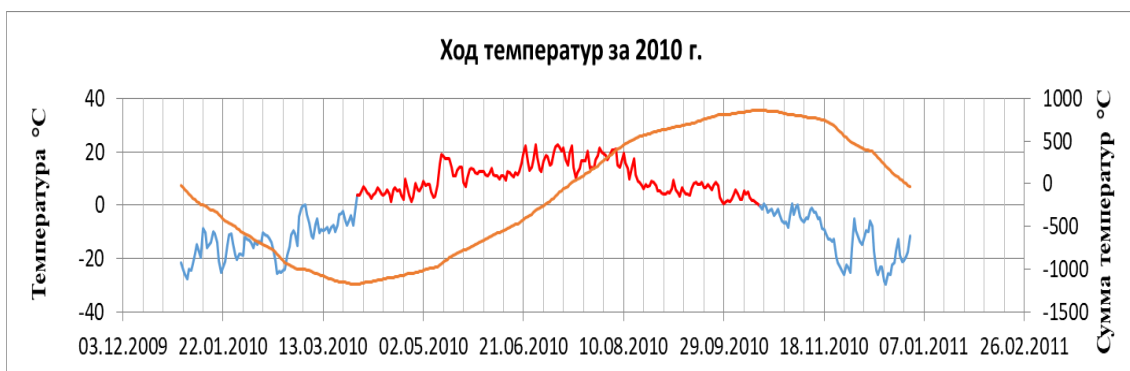
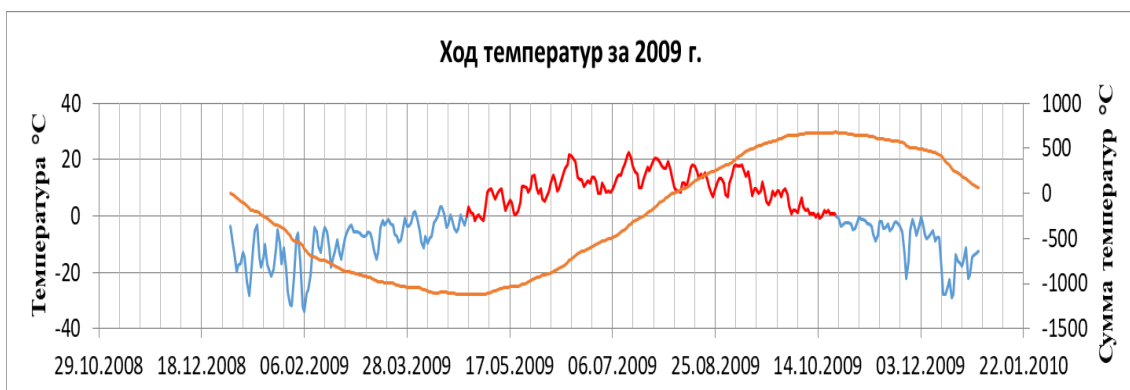
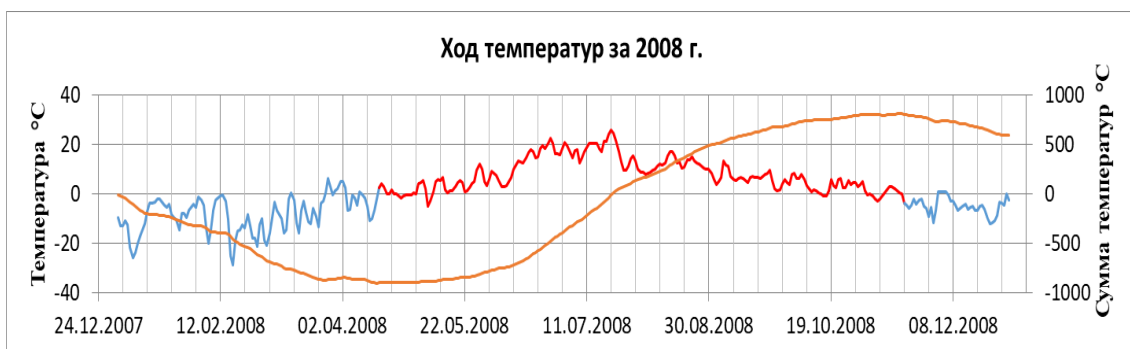
- Собран архив гидрометеорологических данных за период наблюдений с 2006 по 2020 год, который включает в себя ежедневную приземную температуру воздуха и осадки, данные маршрутных снегомерных съемок (измеренные запасы воды в снеге и высоту снежного покрова) и речной сток;
- Для моделирования периода половодья рассчитаны снегозапасы путем решения обратной задачи по оптимальным параметрам k_f и k_t , а также рассчитана водоотдача из снега и водоподача в целом на водосбор;
- Выполнено моделирование снегозапасов с данными маршрутных снегомерных съемок, которое показало высокую сходимость с фактическими значениями по критерию S/σ (в пределах 0,10 – 0,12);
- Выполнено моделирование снегозапасов без данных маршрутных снегомерных съемок, которое показало разность с фактическими значениями, не превышающую 10%;
- Проведено экспериментальное моделирование расходов воды зимнего меженного стока по кривой истощения с начала календарного года на всем рассматриваемом периоде;
- Для периода весеннего половодья выполнен прогноз расходов воды без корректировки, который показал несоответствие оптимальных параметров физической сущности процесса и неэффективную оценку по критерию S/σ , что ведет к необходимости проведения более детального исследования и учета дополнительных данных;
- Выполнен прогноз расходов воды весеннего половодья с корректировкой на 1 сутки, который дал эффективную оценку по критерию S/σ (в пределах значения 0,35).

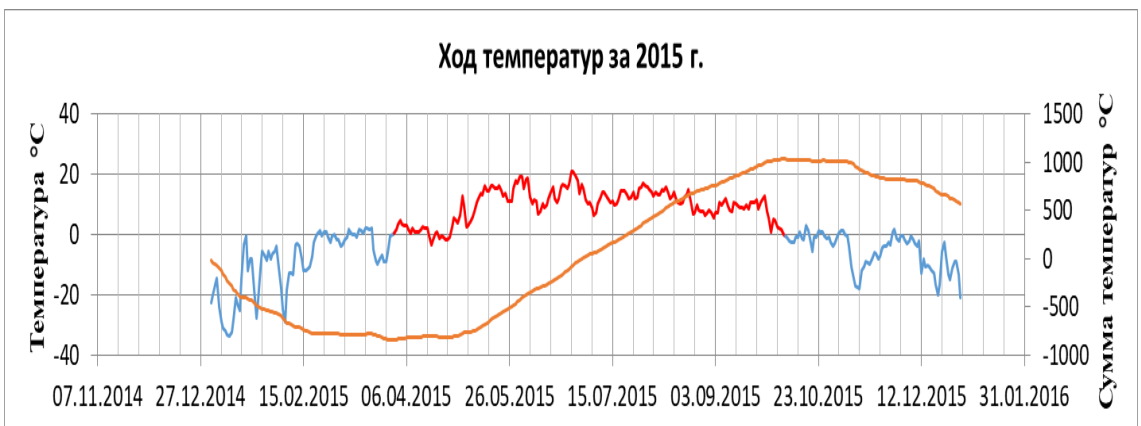
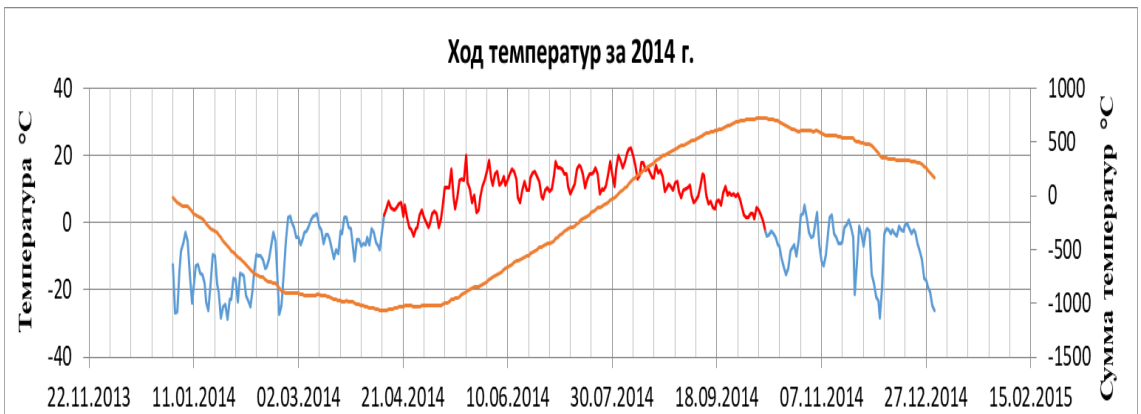
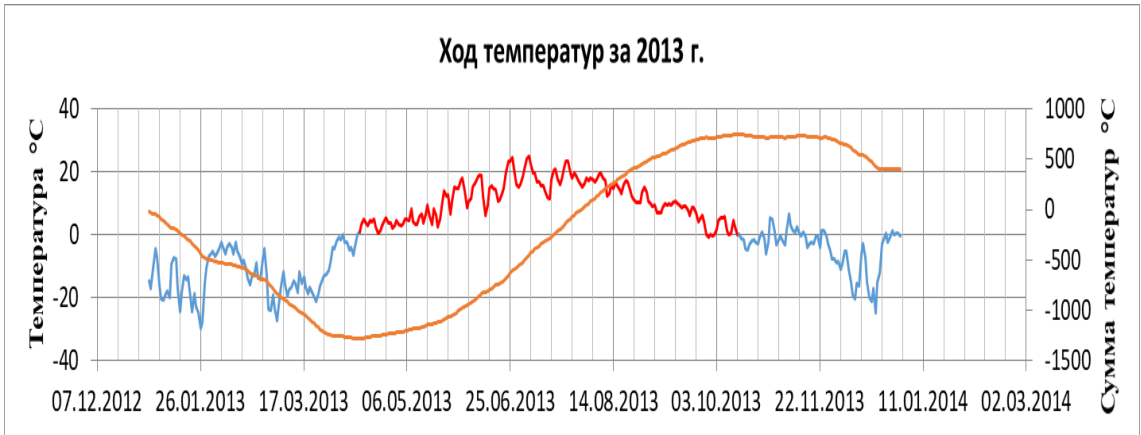
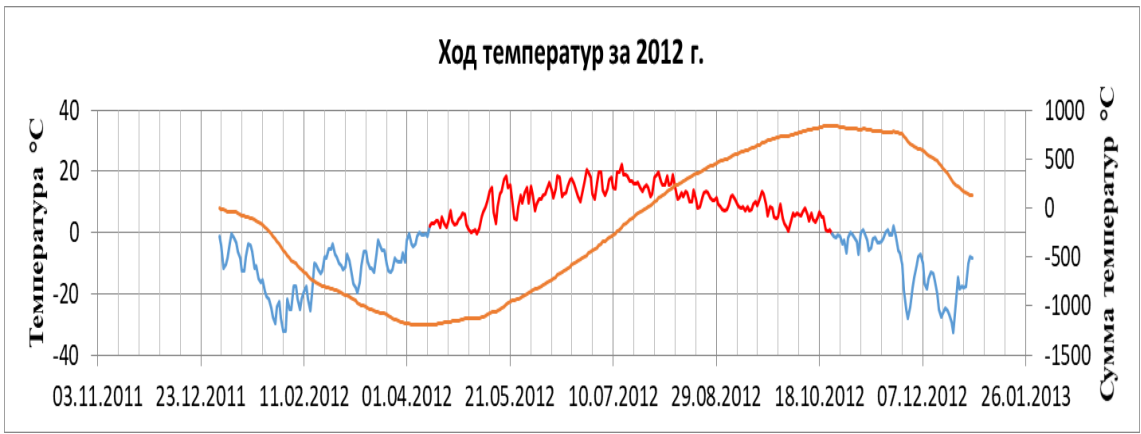
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

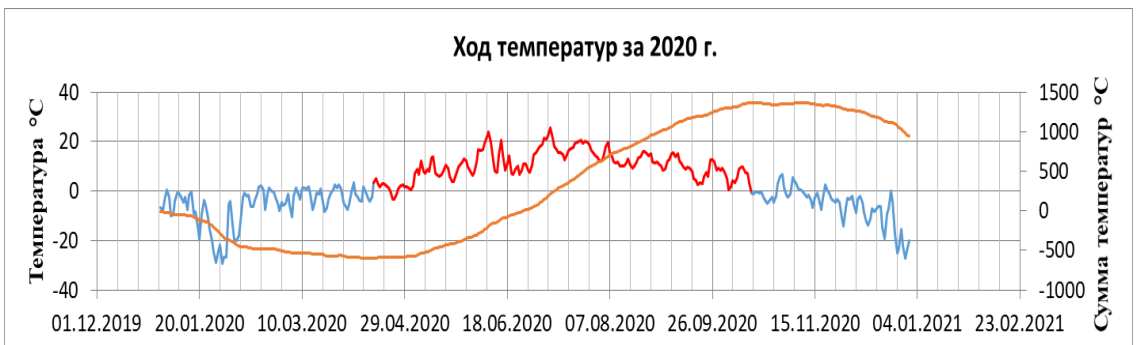
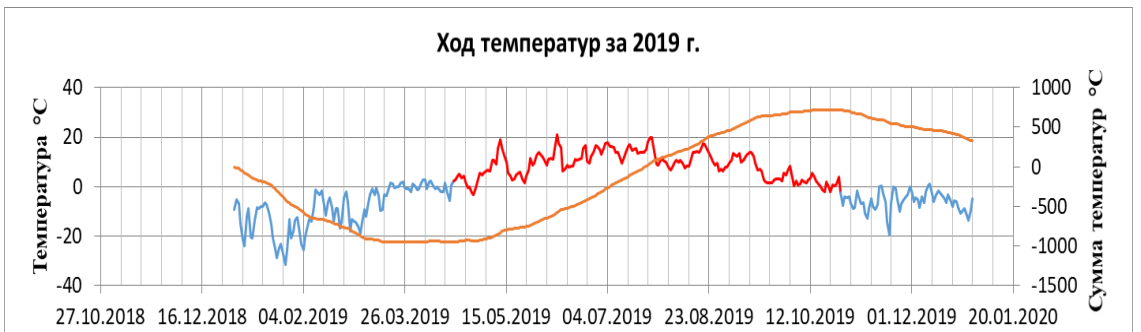
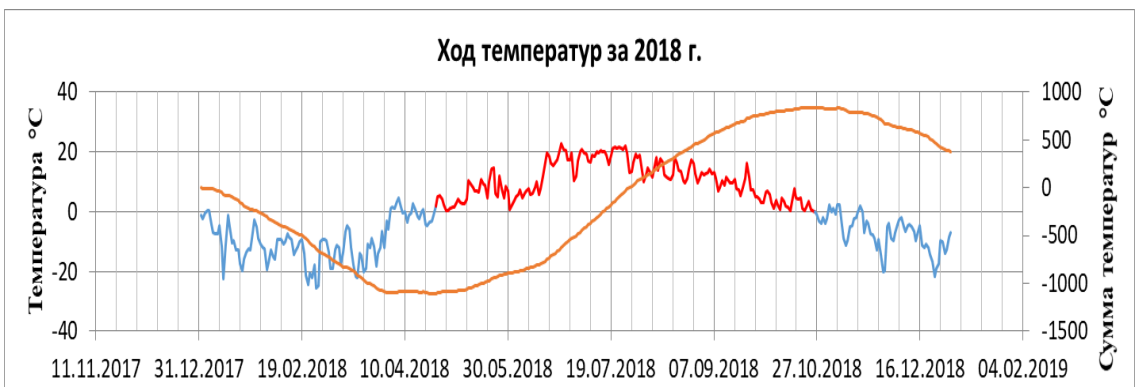
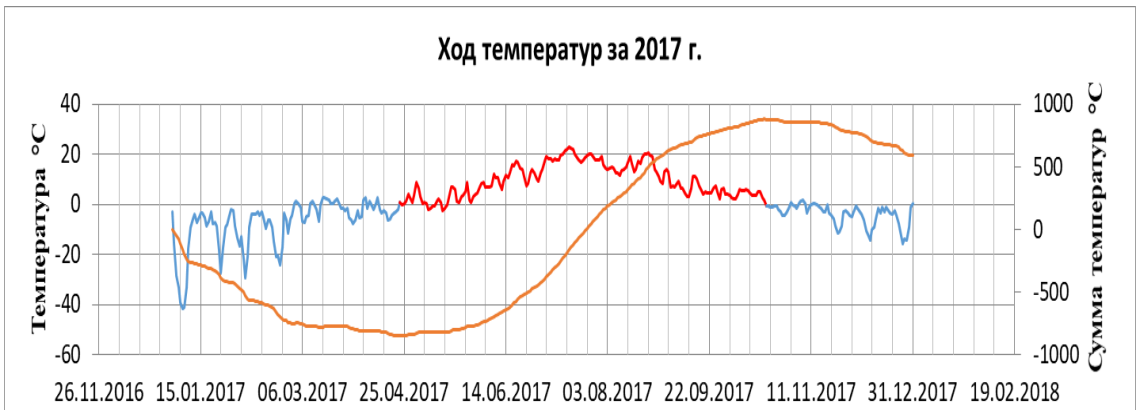
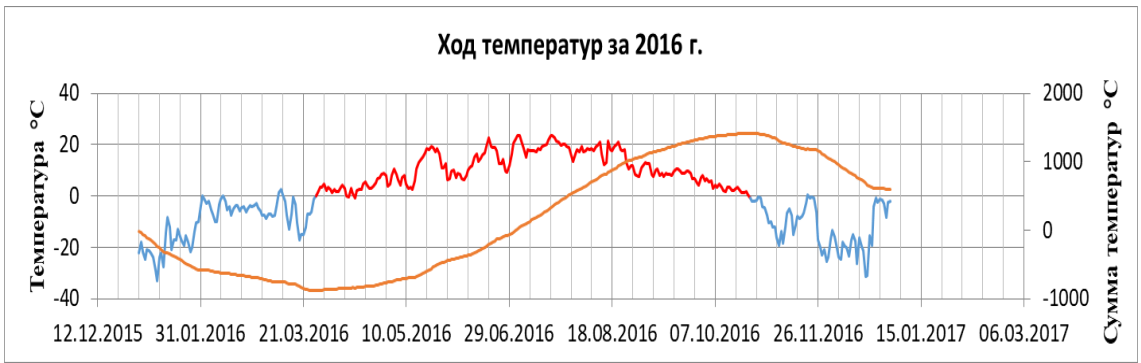
- 1 Река Мезень/Марийские лесоходы. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://komanda-k.ru/Россия/река-мезень> (Дата обращения 02.11.2022)
- 2 Геологическое строение территории Архангельской области. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: https://studbooks.net/1072389/agropromyshlennost/geologicheskoe_stroenie_territorii_rayona_harakteristika_pochvoobrazuyuschih_porod_vliyanie_pochvoobrazuyuschih (Дата обращения 17.11.2022)
- 3 Основные гидрологические характеристики том 3, выпуск 2, Северный край.
- 4 Бассейн Мезени. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: http://www.book-ist.ru/prkomi/ch2_4.html (Дата обращения 24.01.23)
- 5 Максимальный сток рек современные представления о его формировании. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: https://studopedia.net/6_106504_maksimalniy-stok-rek--sovremennie-predstavleniya-o-ego-formirovaniy.html (Дата обращения 04.02.23)
- 6 Сеть станций Северного УГМС. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <http://www.sevmeteo.ru/company/stations.php> (Дата обращения 08.03.23)
- 7 Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <http://meteo.ru/> (Дата обращения 15.03.23)
- 8 Государственный мониторинг водных объектов. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (Дата обращения 16.03.23)

- 9 Георгиевский Ю.М. Гидрологические прогнозы. [Текст]/ Ю.М. Георгиевский, С.В. Шаночкин. – СПб, изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.
- 10 Снегозапасы – Википедия. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Снегозапасы> (Дата обращения 12.04.23)
- 11 Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. [Текст]/ В.П. Дьяконов. 1989. – 248 с.
- 12 Поиск решения в excel. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://my-excel.ru/excel/poisk-reshenija-v-excel.html> (Дата обращения 03.05.23)
- 13 Коваленко В.В. Моделирование гидрологических процессов. [Текст]/ В.В. Коваленко, Н.В. Викторова, Е.В. Гайдукова. – СПб, изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.

Приложение А – Хронологический график хода температур и сумм температур с 2008 по 2020 г. по гидропосту Макариб

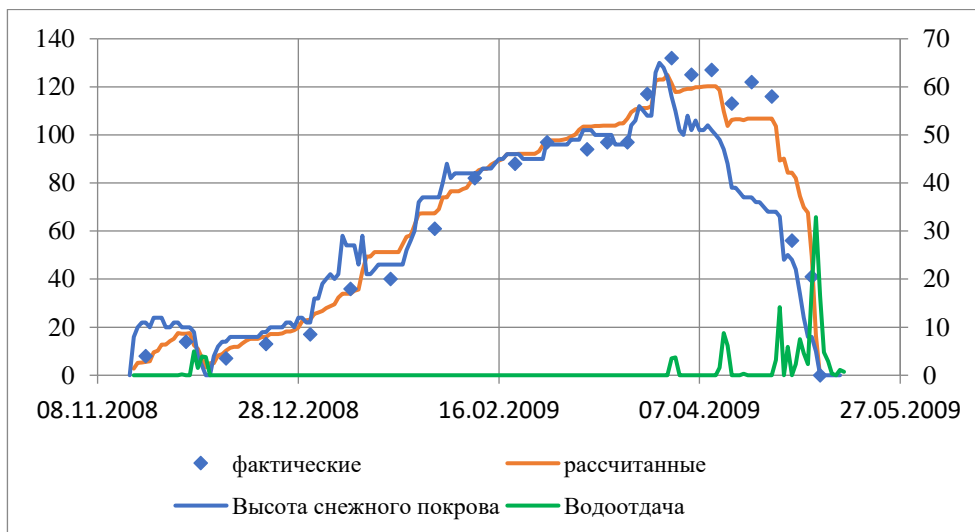
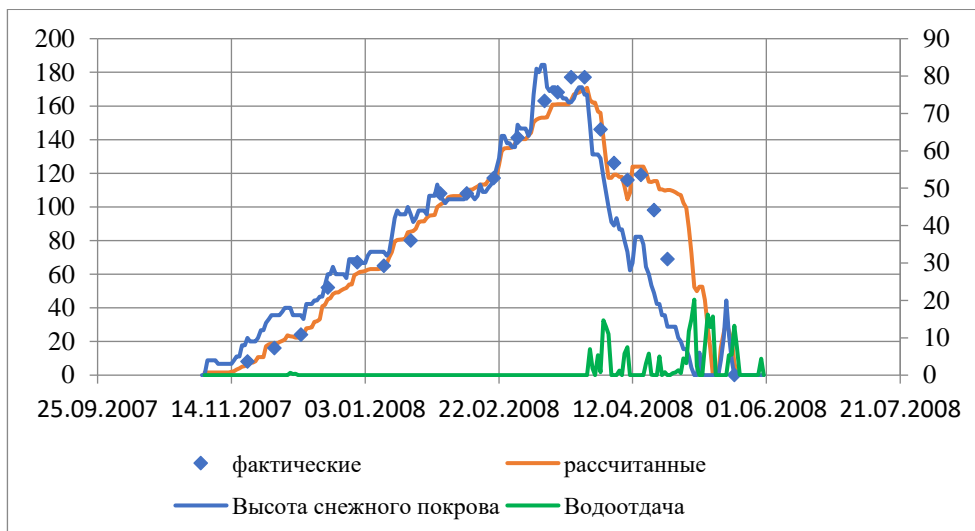


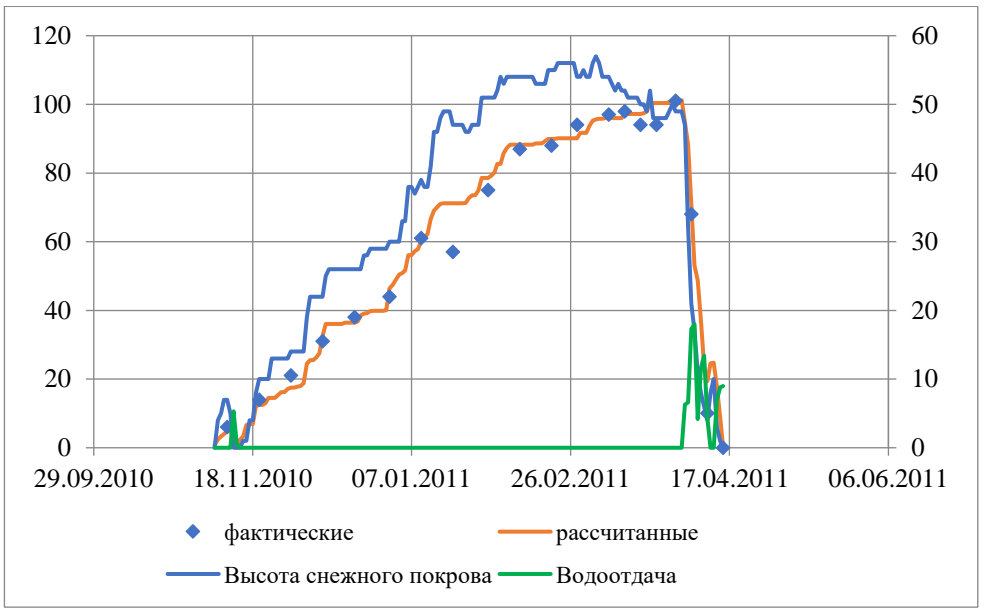
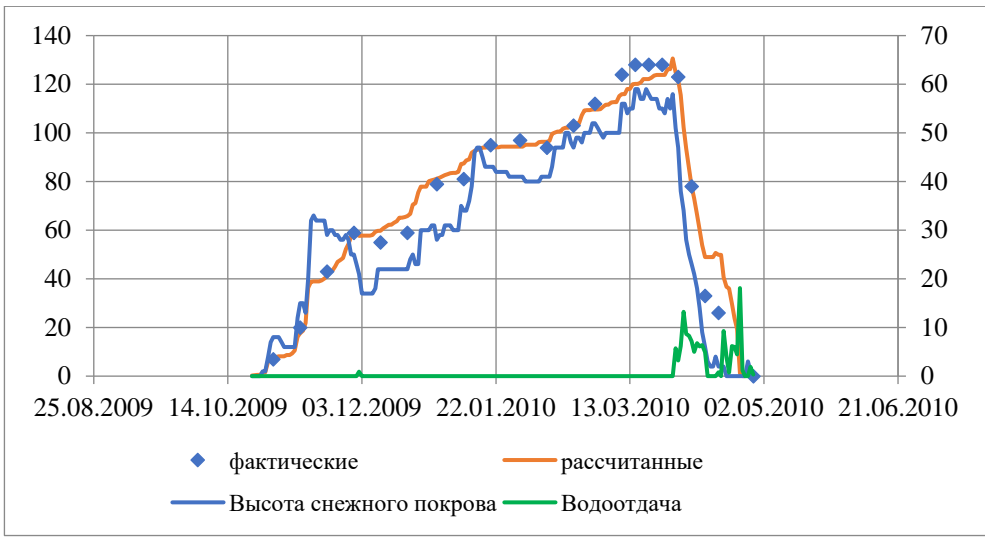


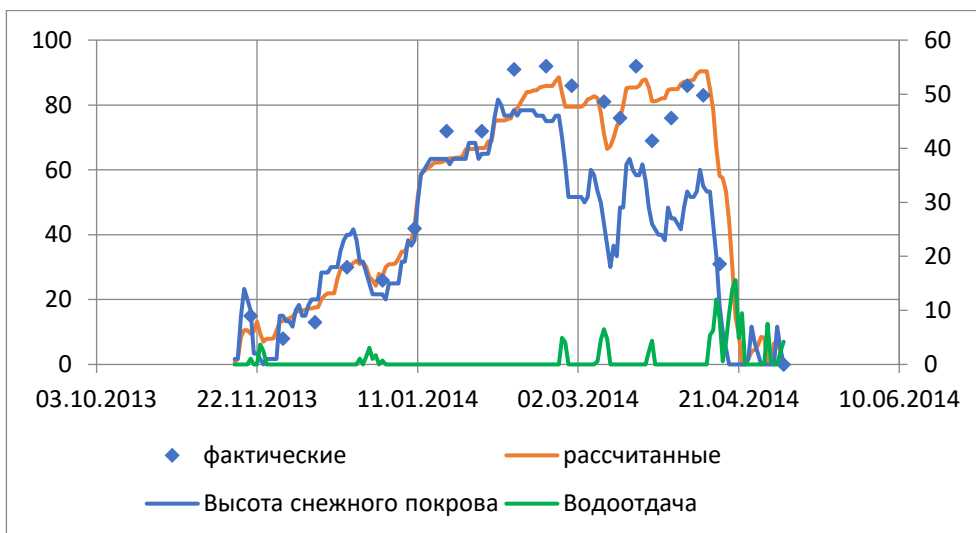
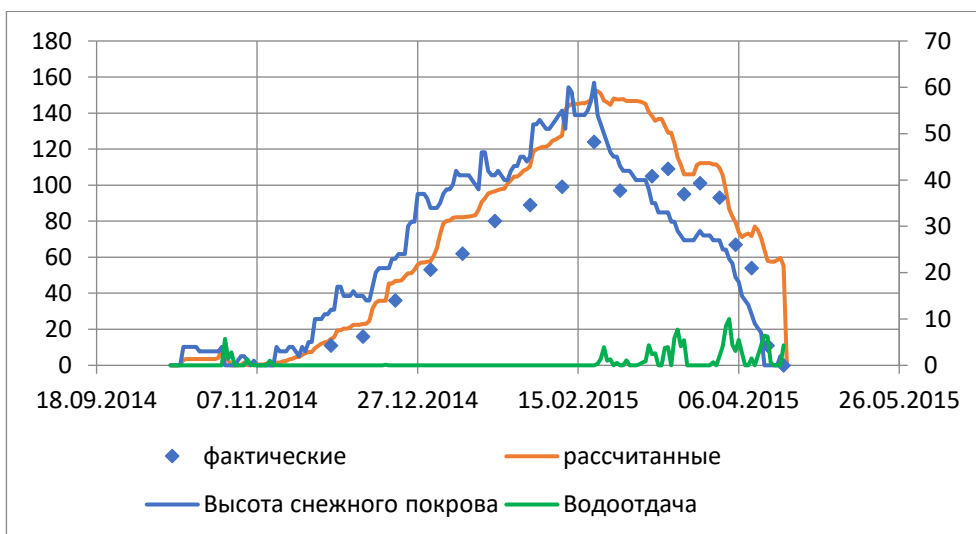


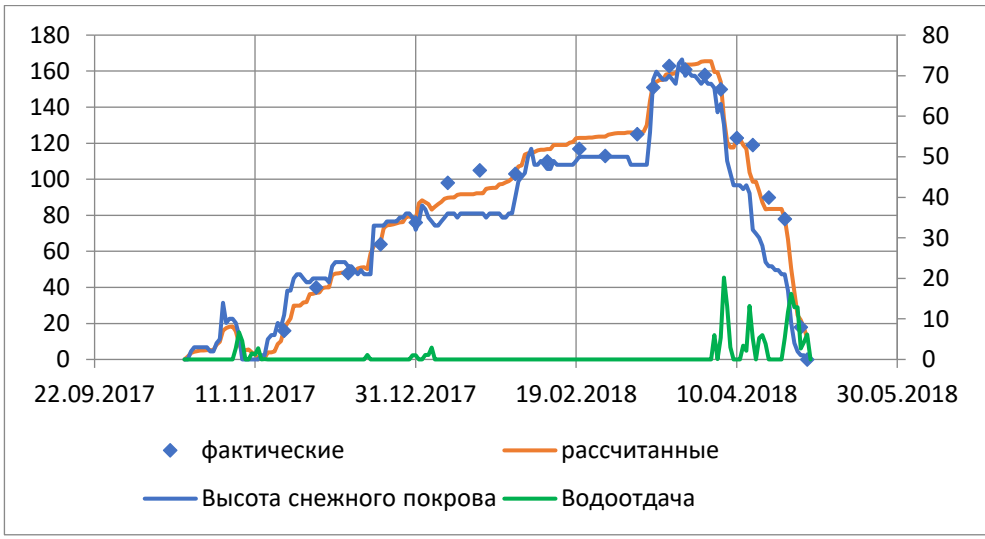
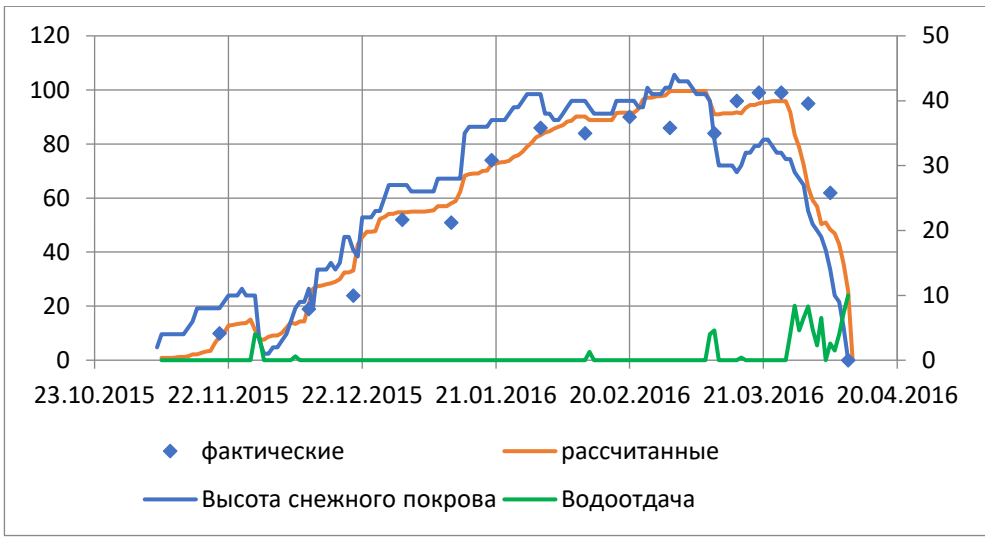
Приложение Б – Графики сравнения фактических и расчетных значений
запасов воды в снеге

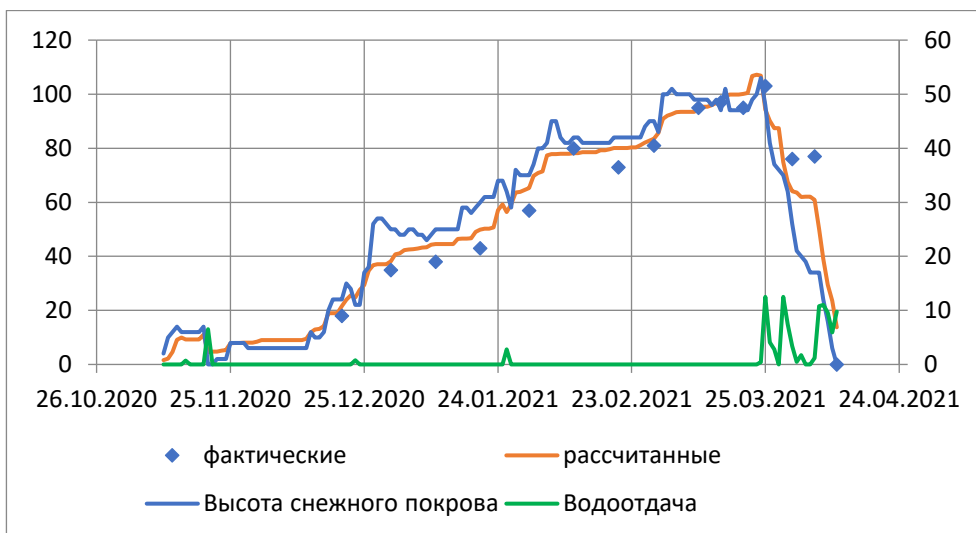
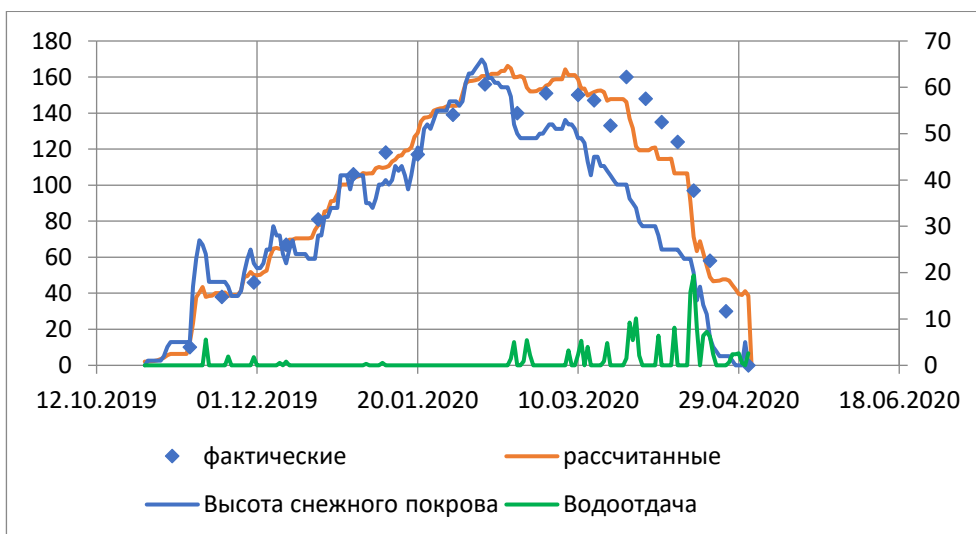
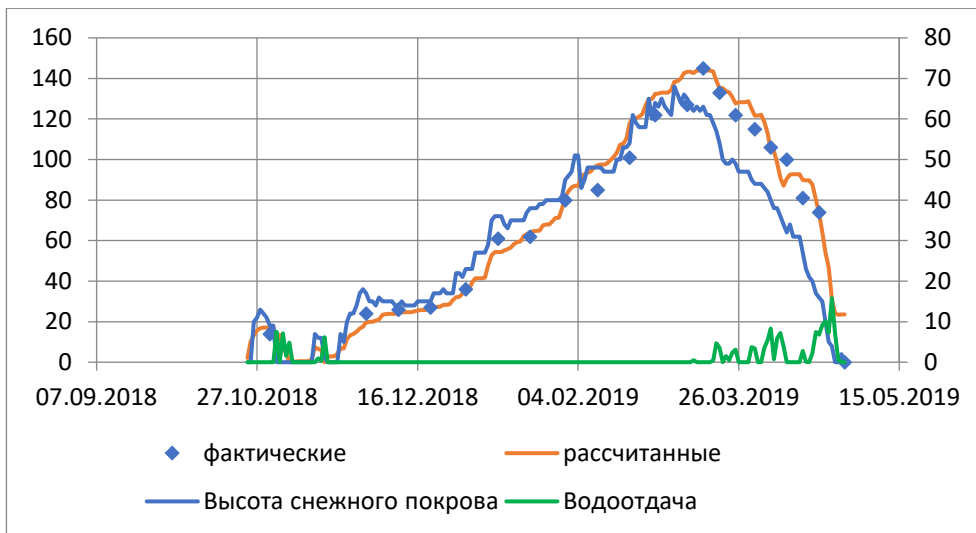
1) Метеостанция Сура 2007 – 2020 г.



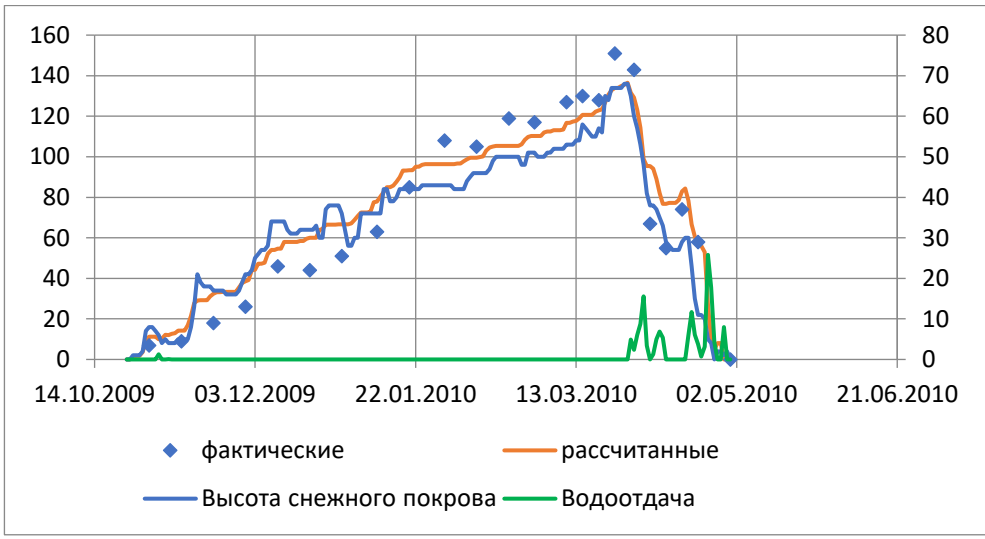
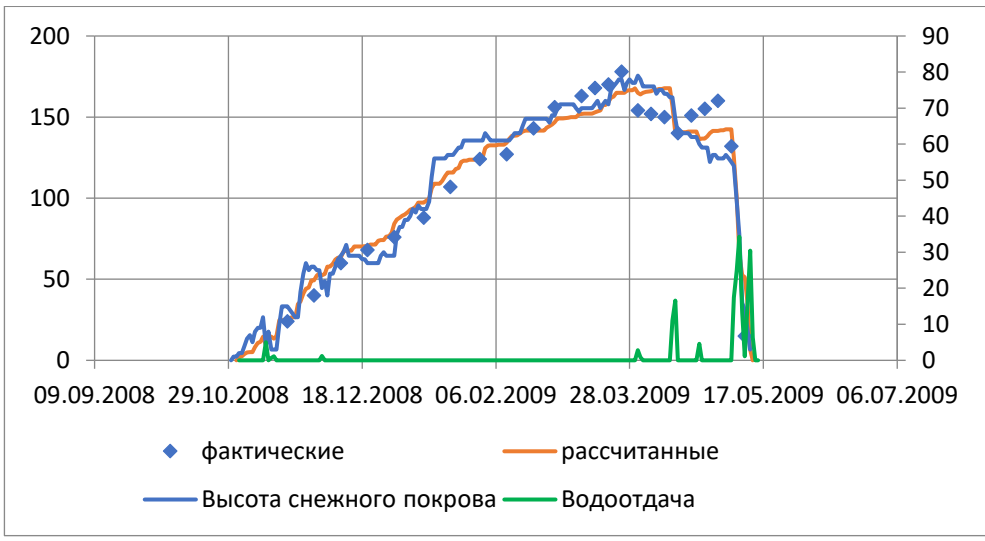


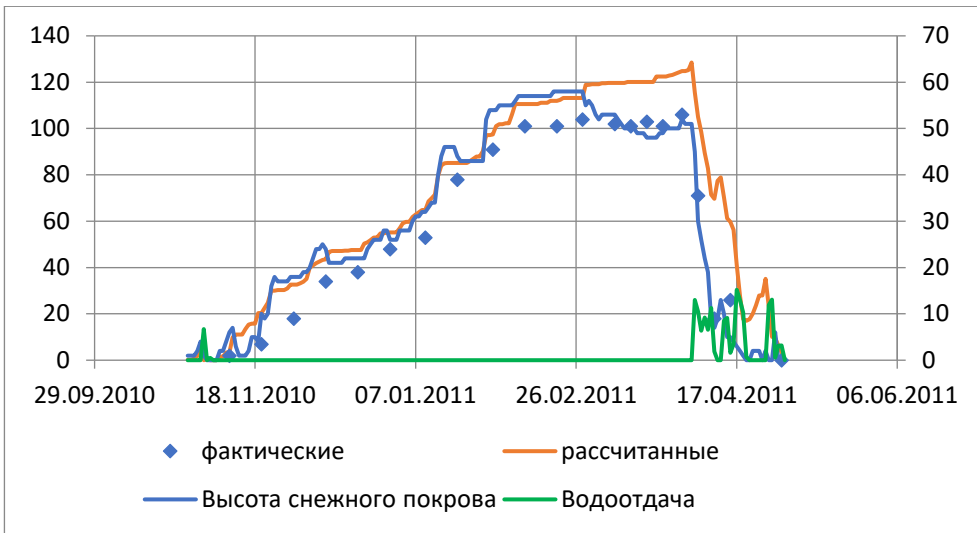


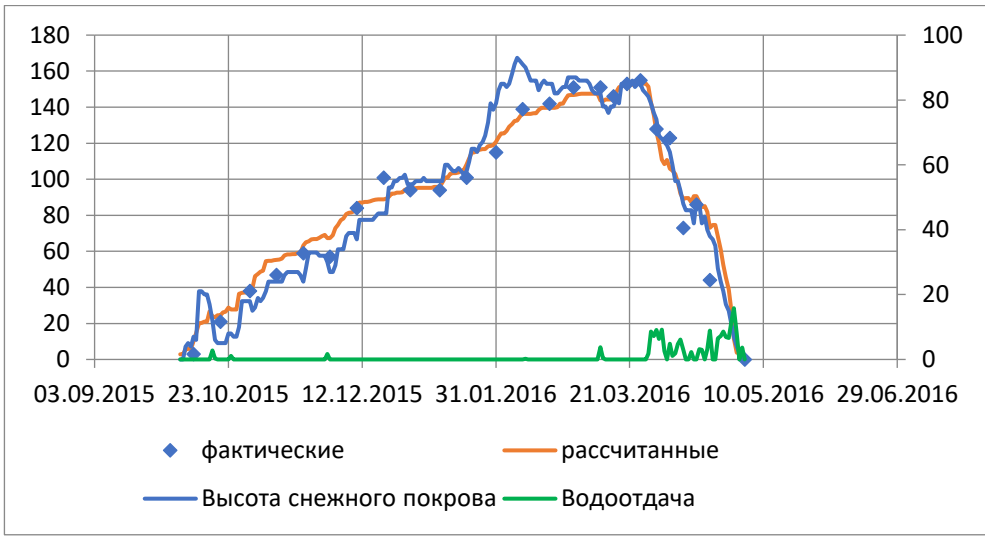
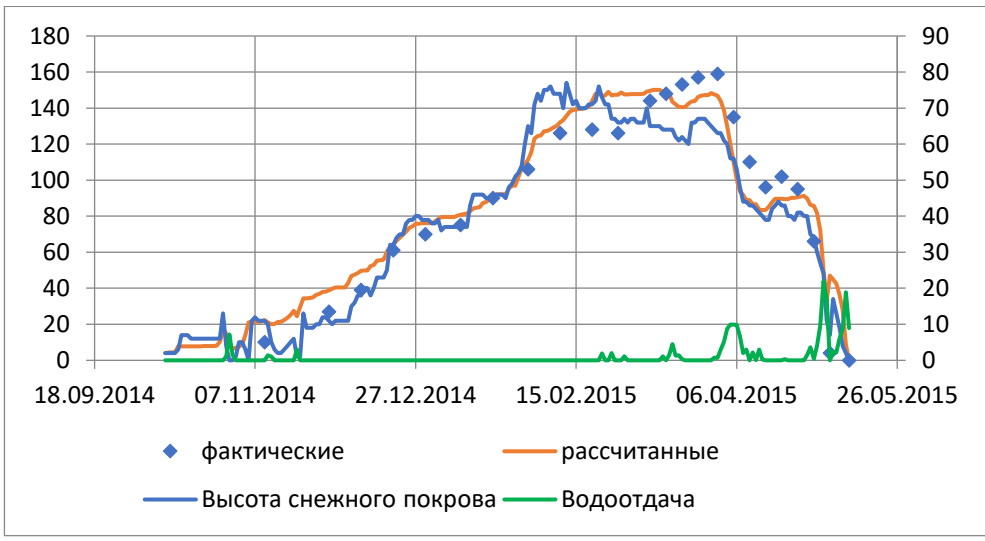
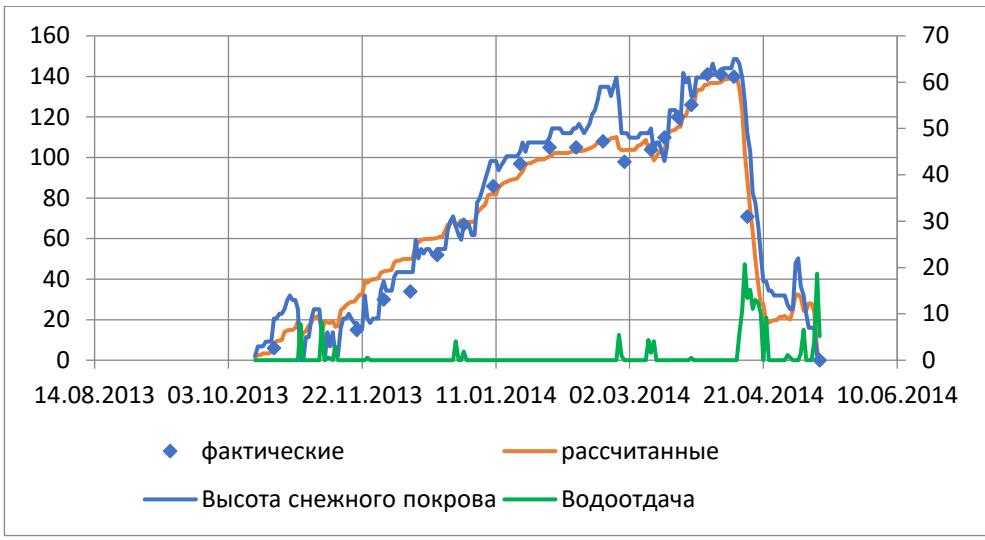


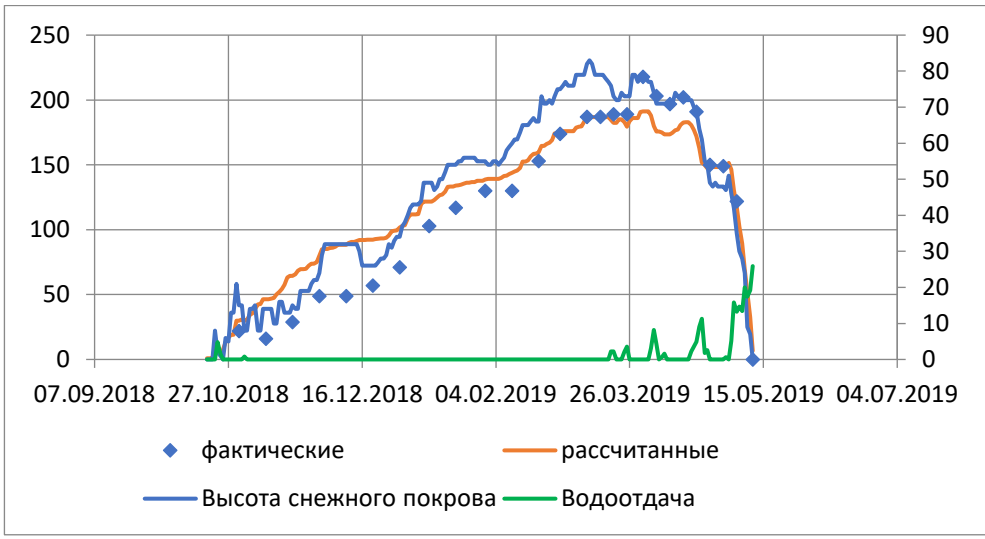
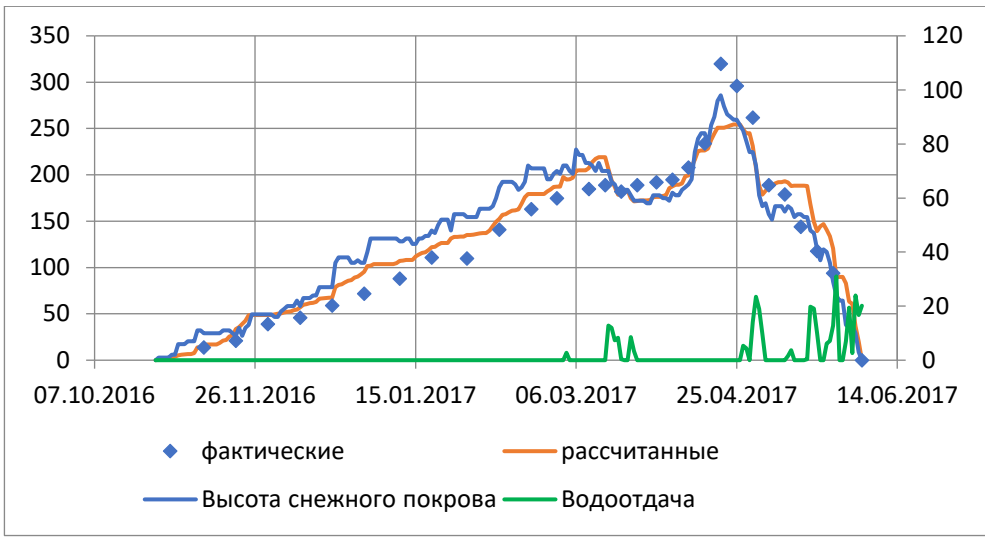


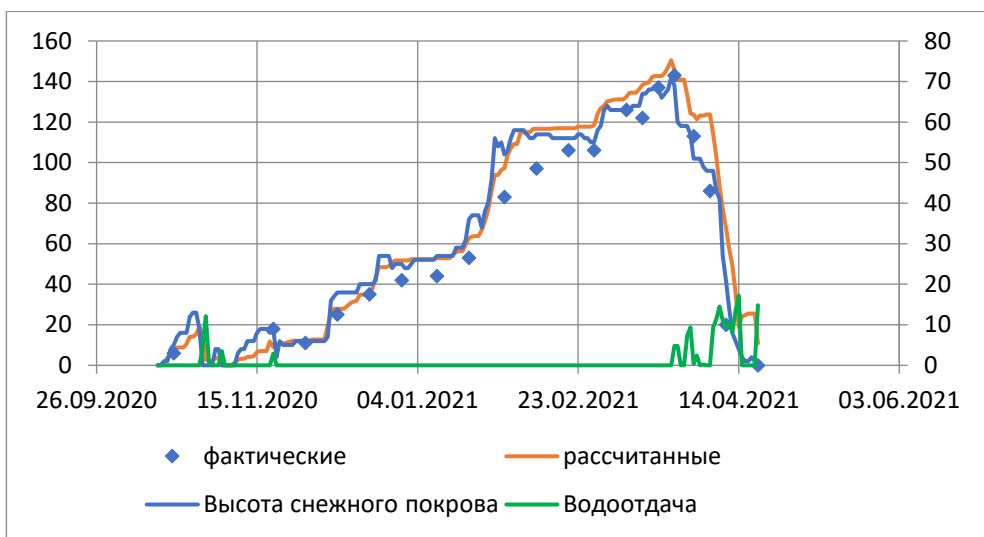
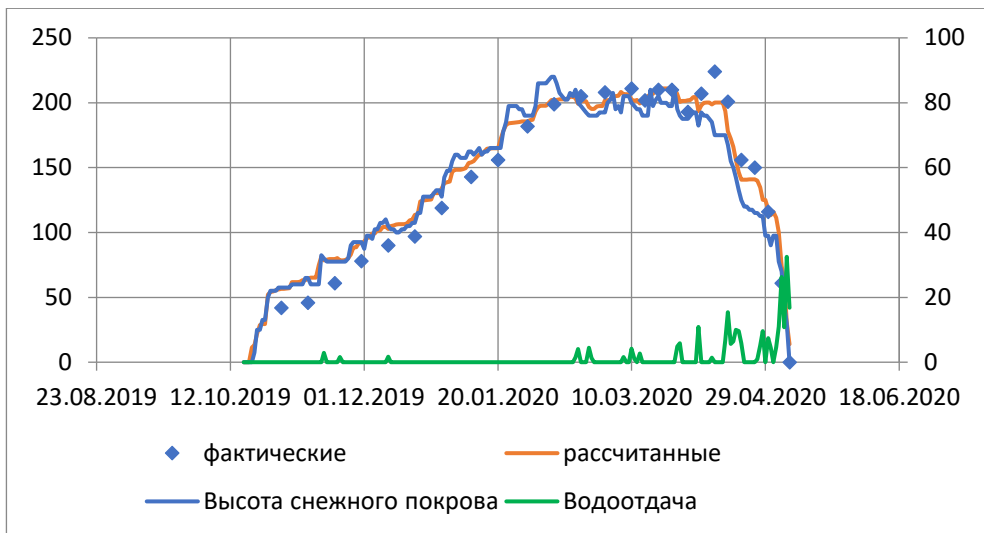
2) Метеостанция Усть-Цильма 2007 – 2020 г.



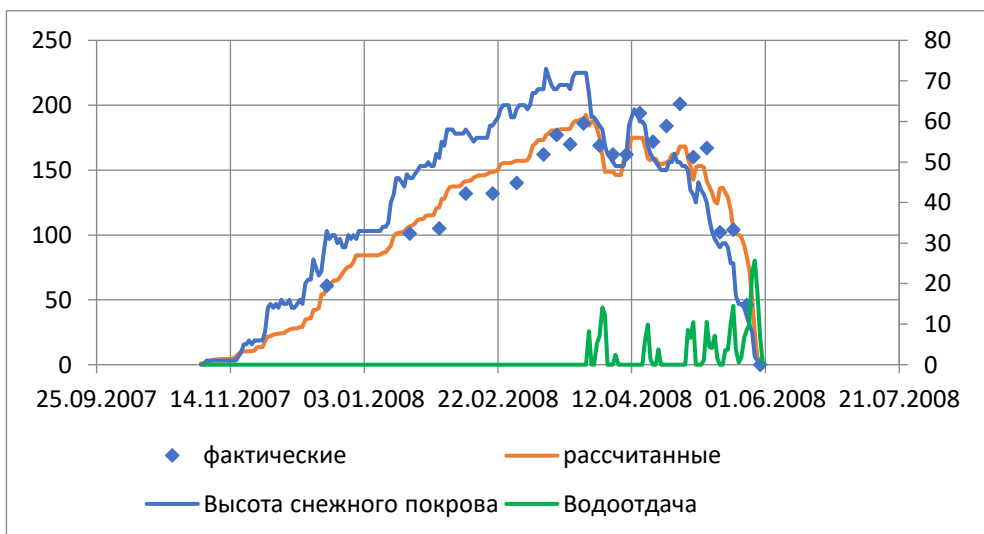


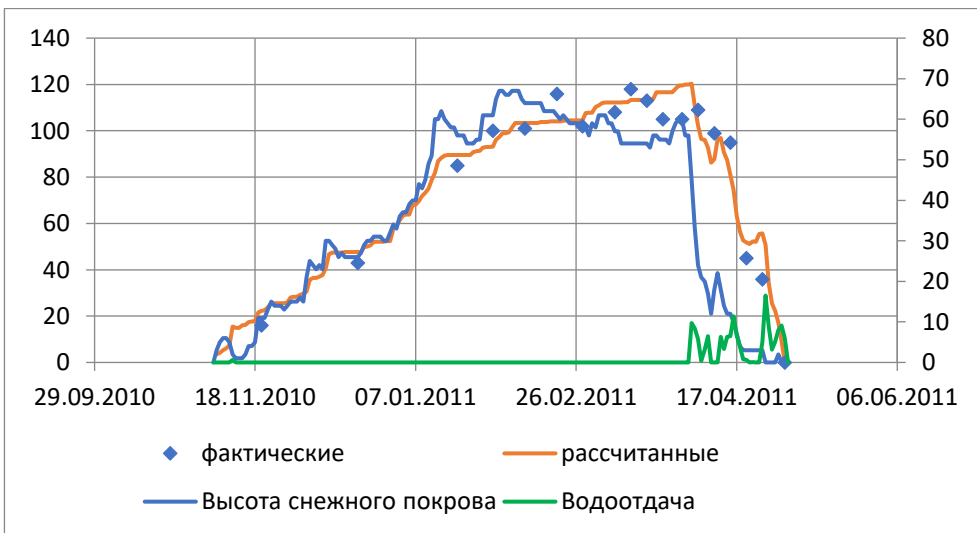
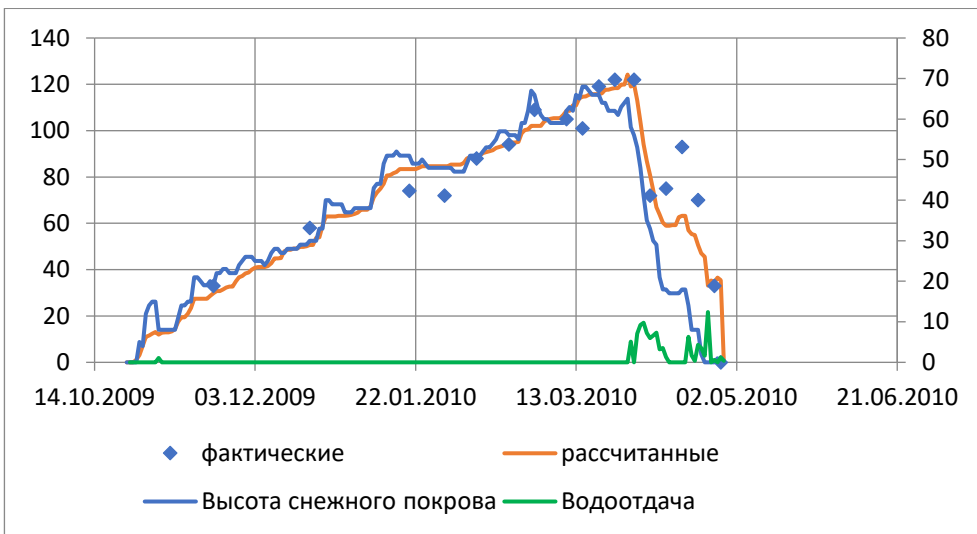
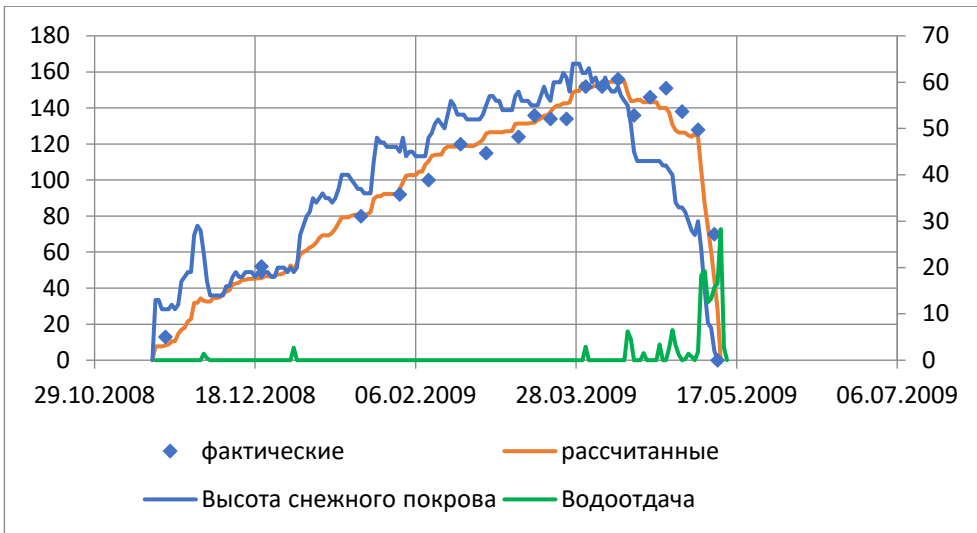


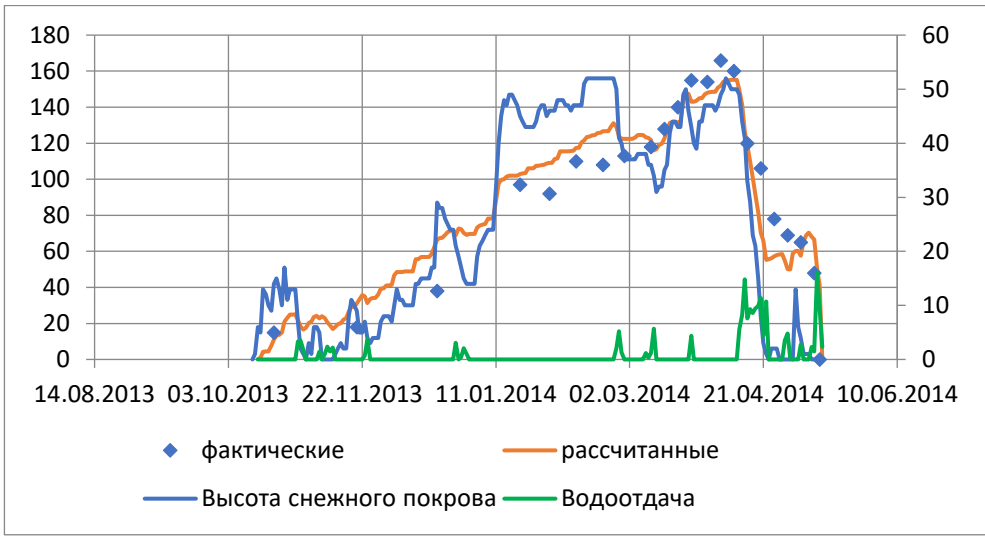
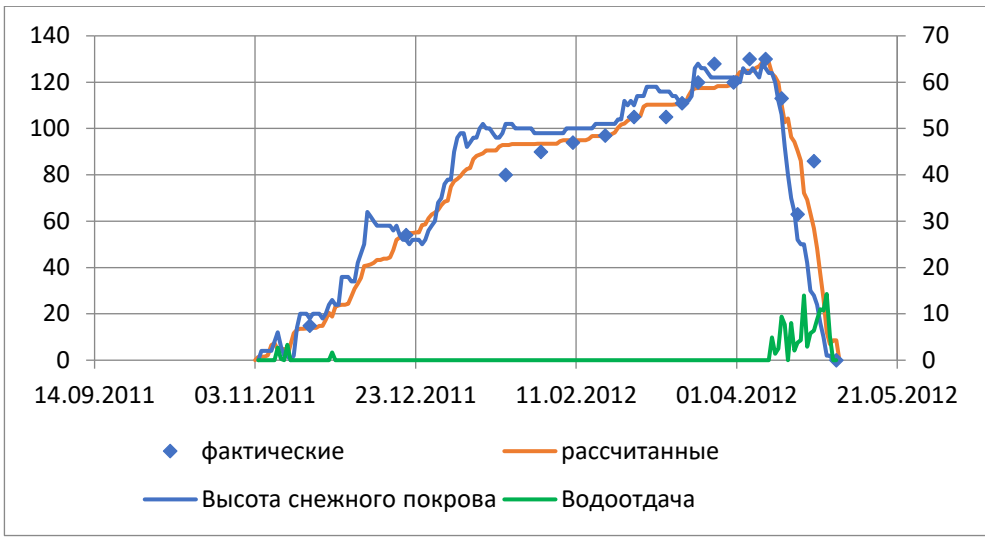


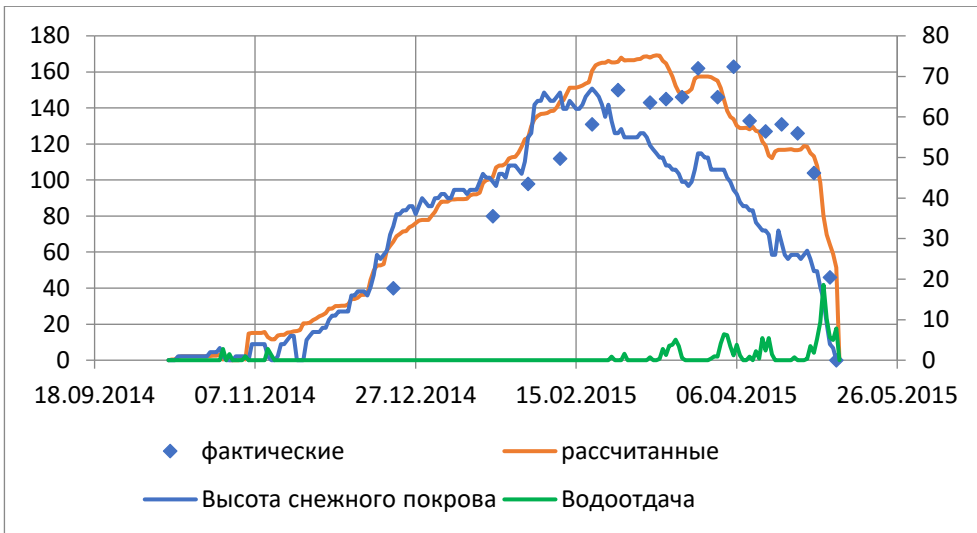


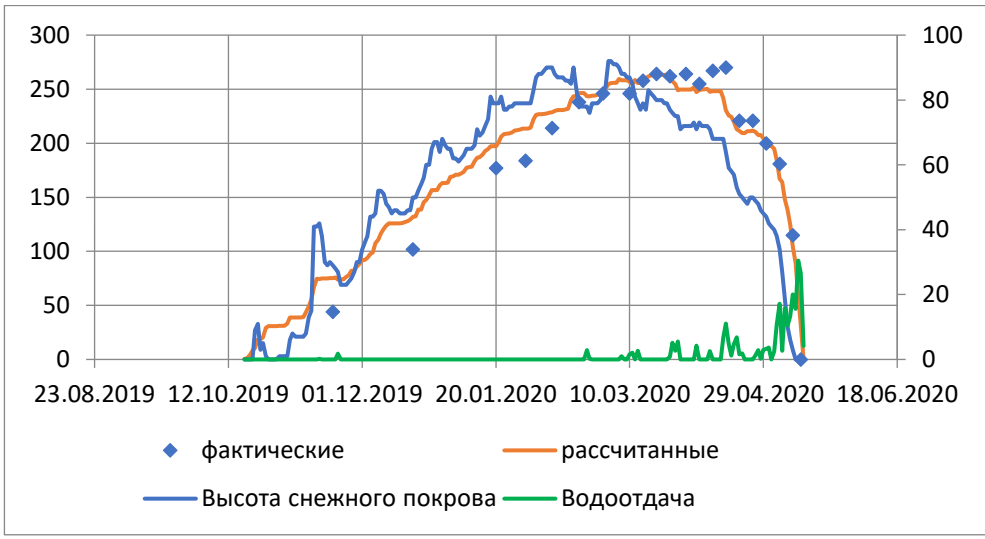
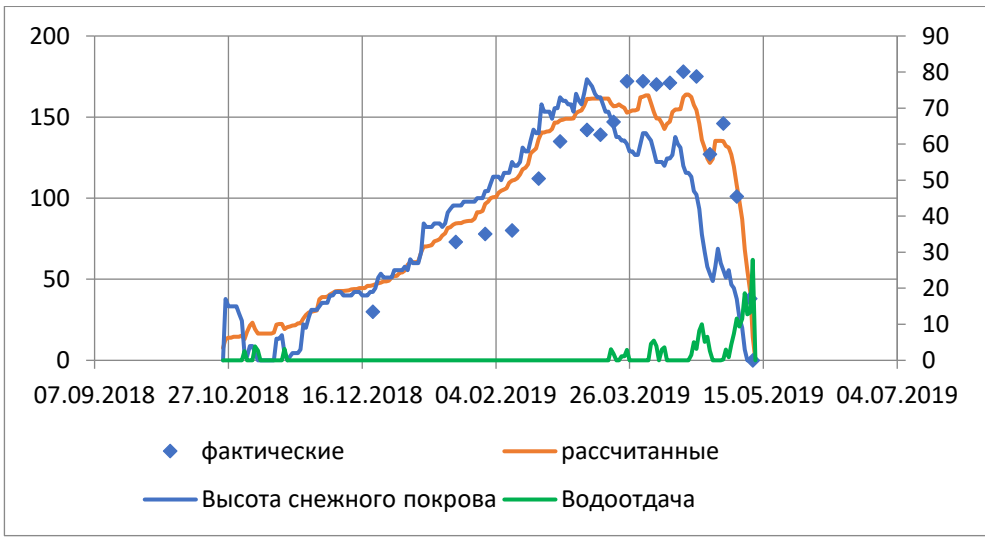
3) Метеостанция Койнас 2007 – 2020 г.

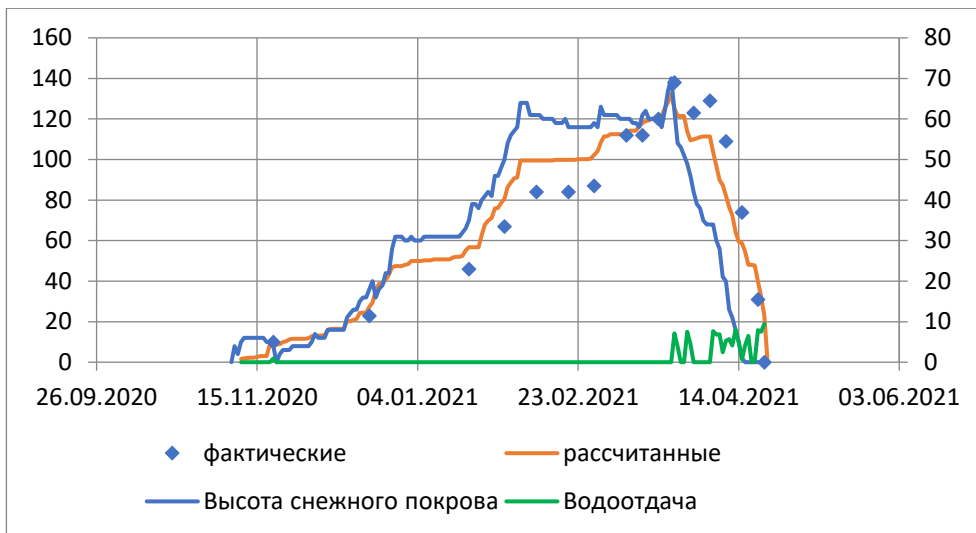




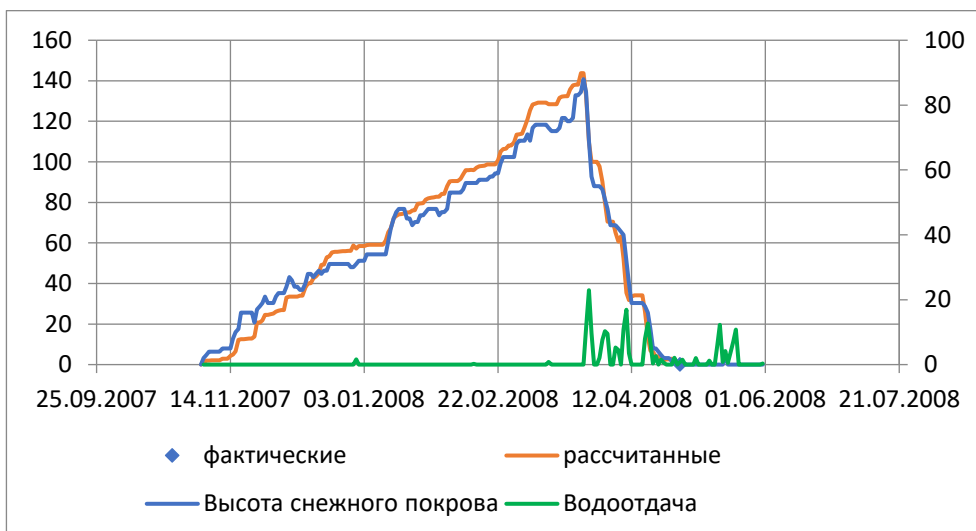


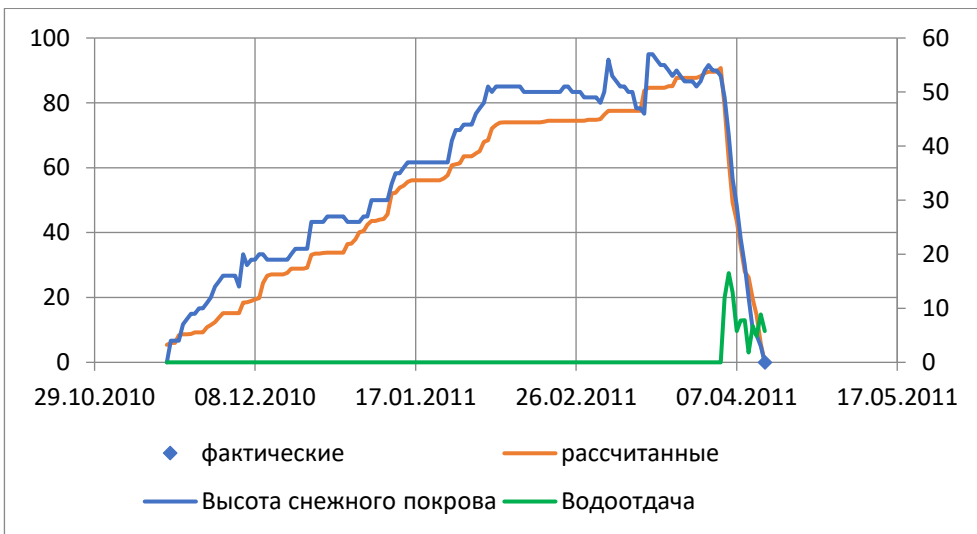
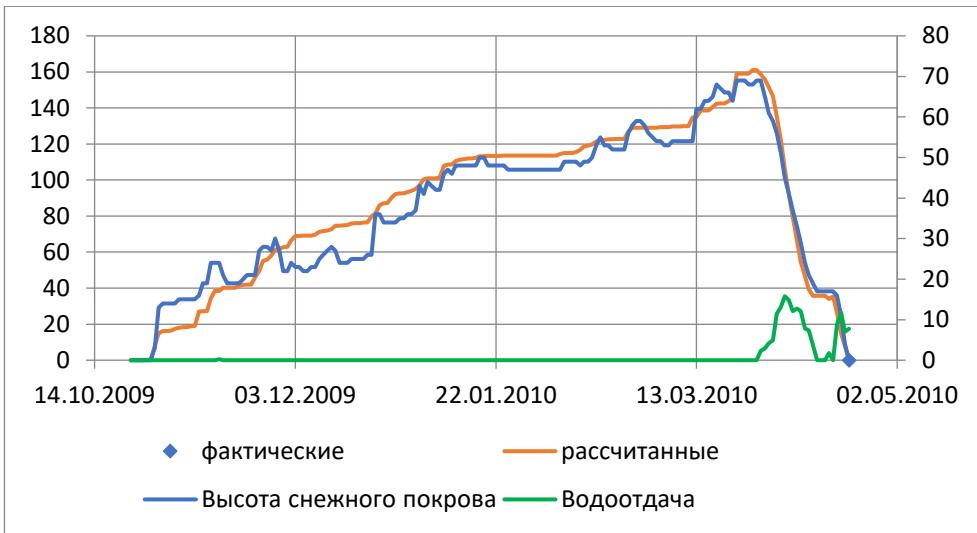


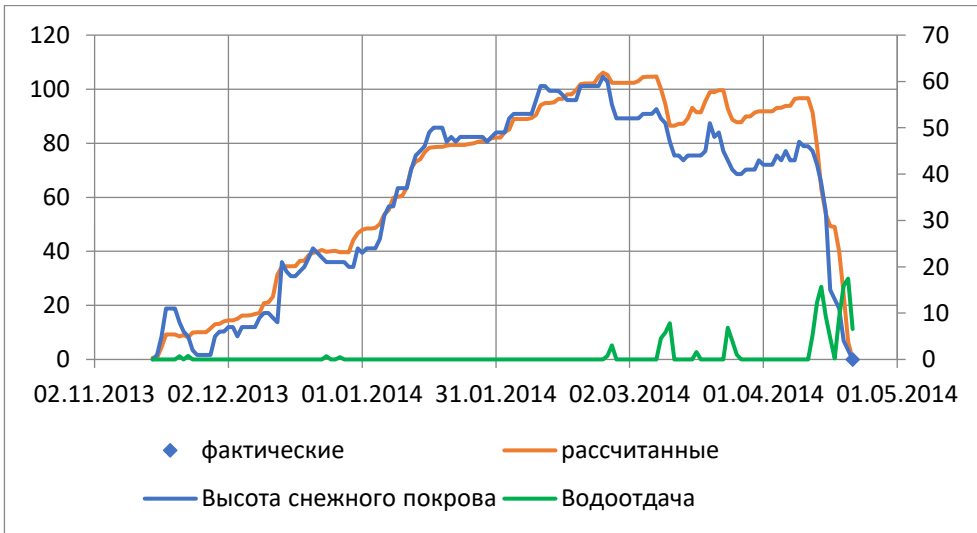
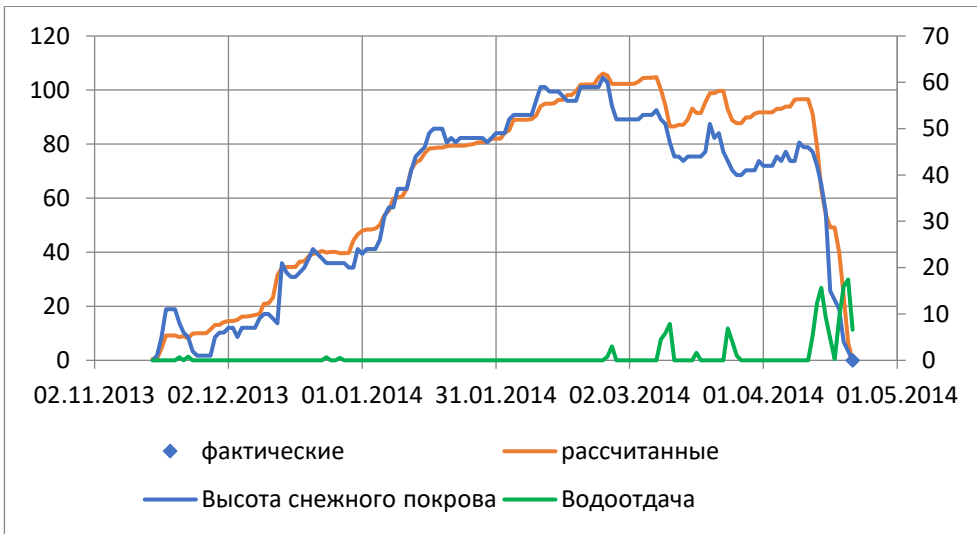
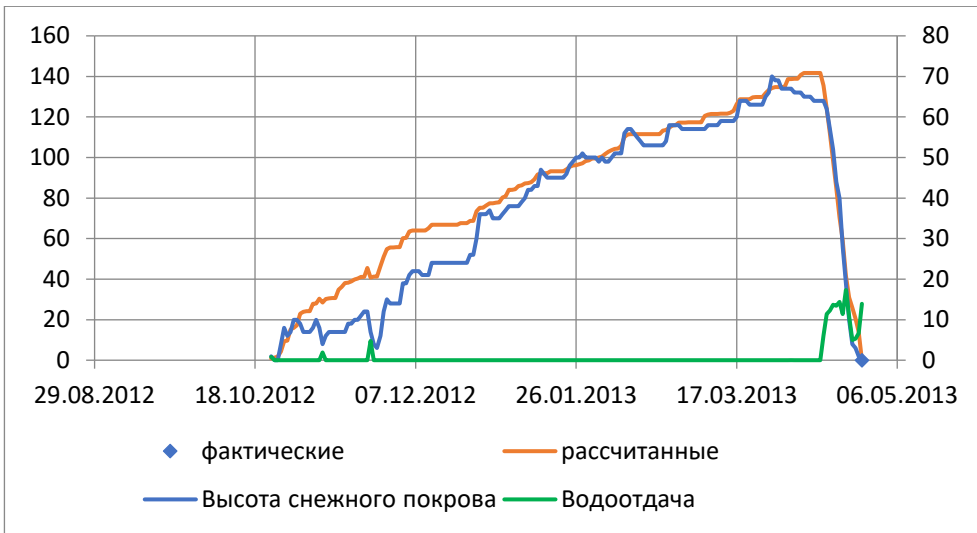


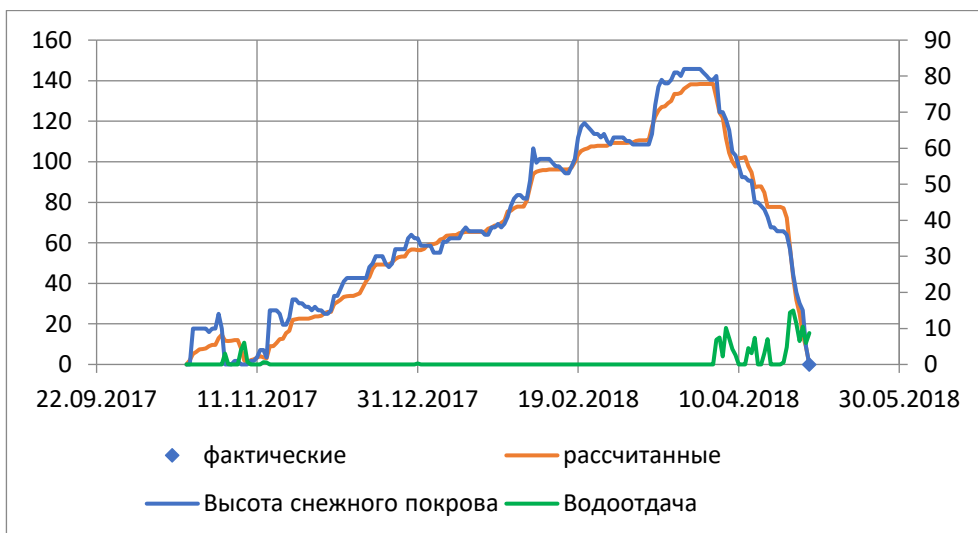
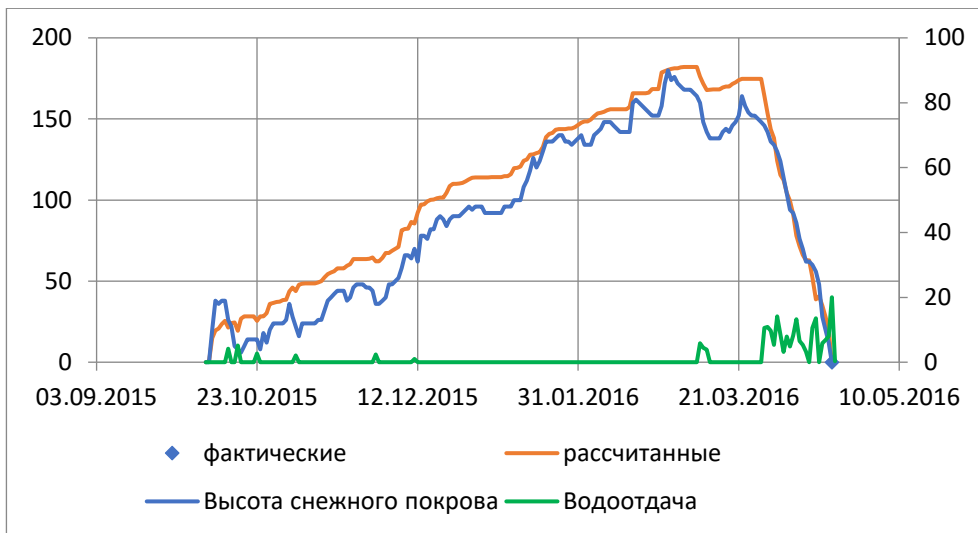


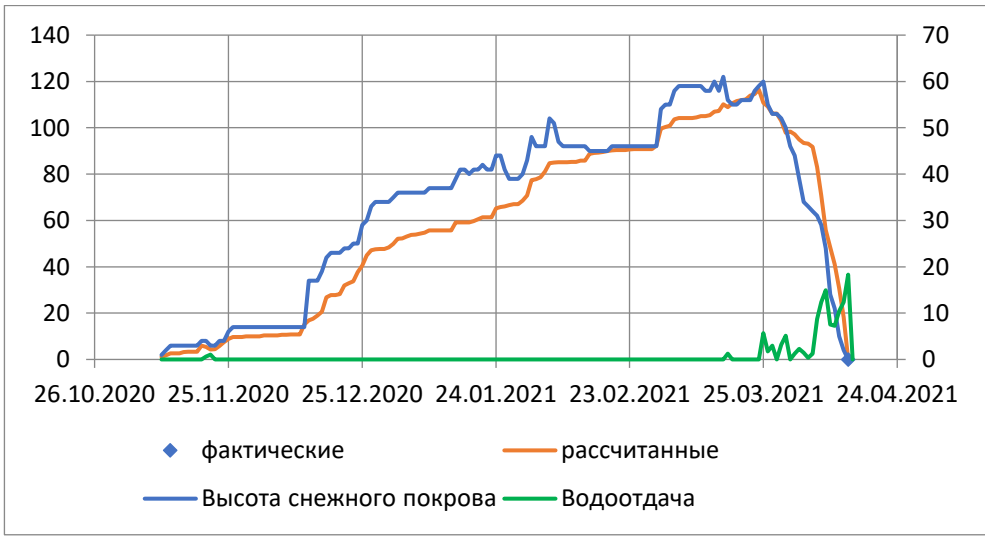
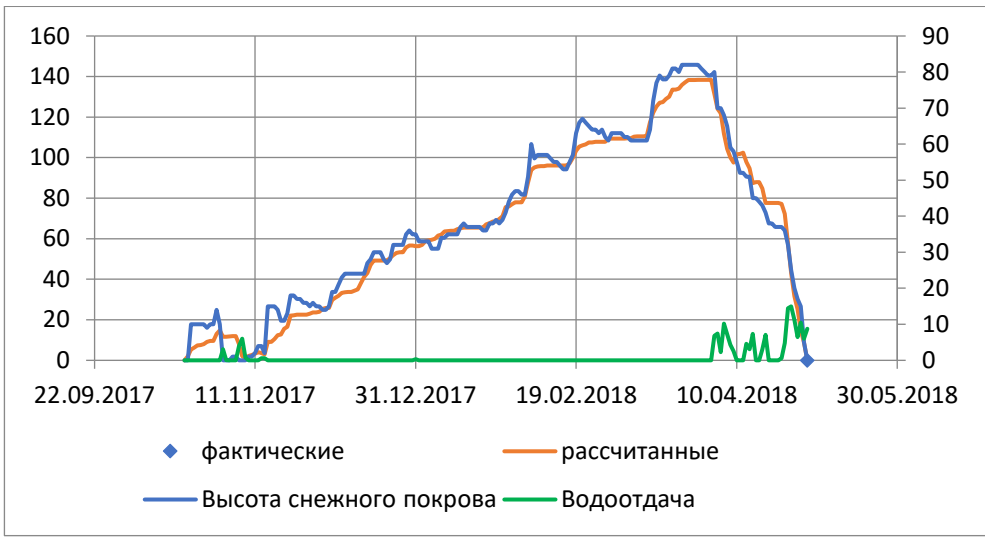
4) Метеостанция Усть-Вымь 2007 – 2020 г.



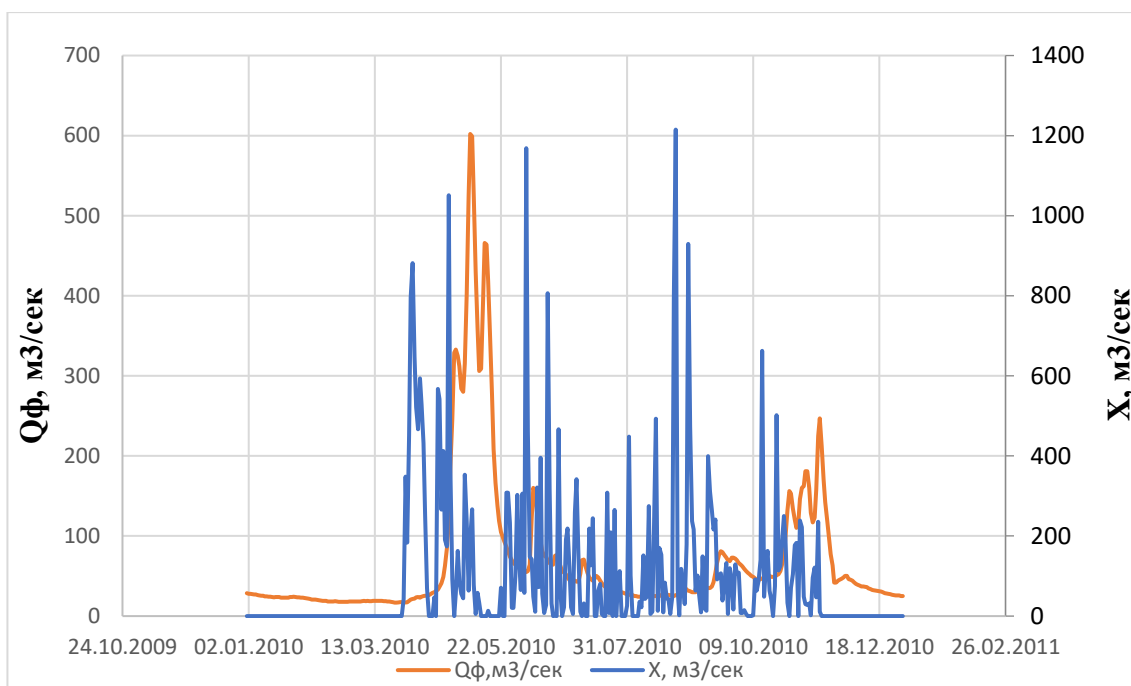
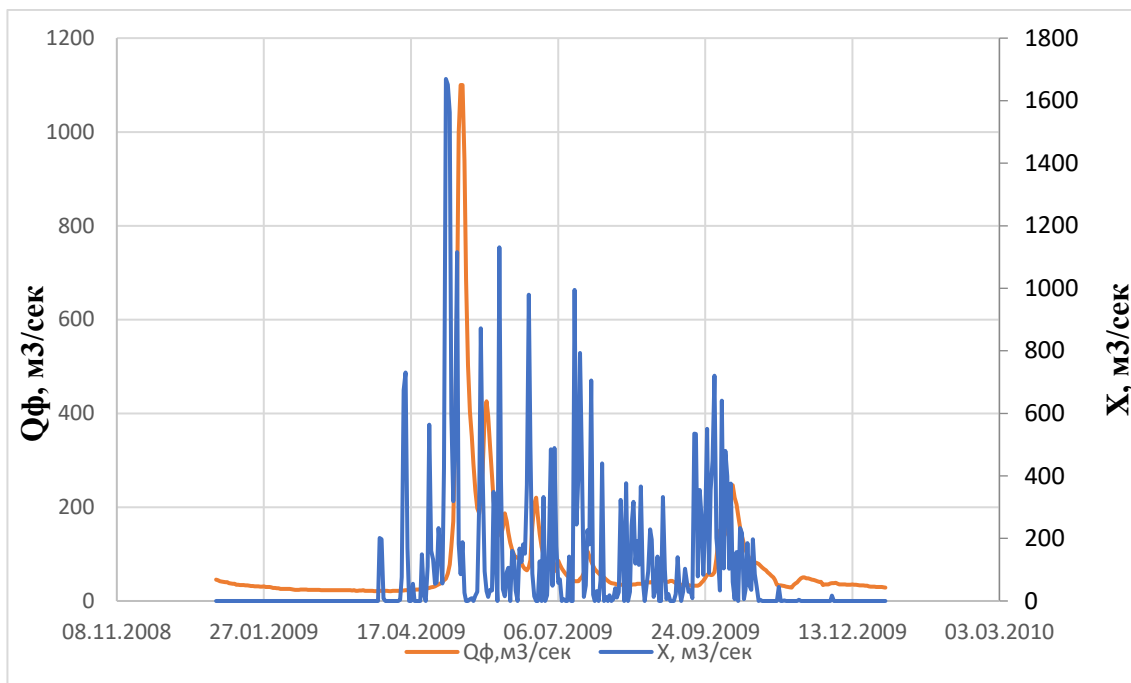


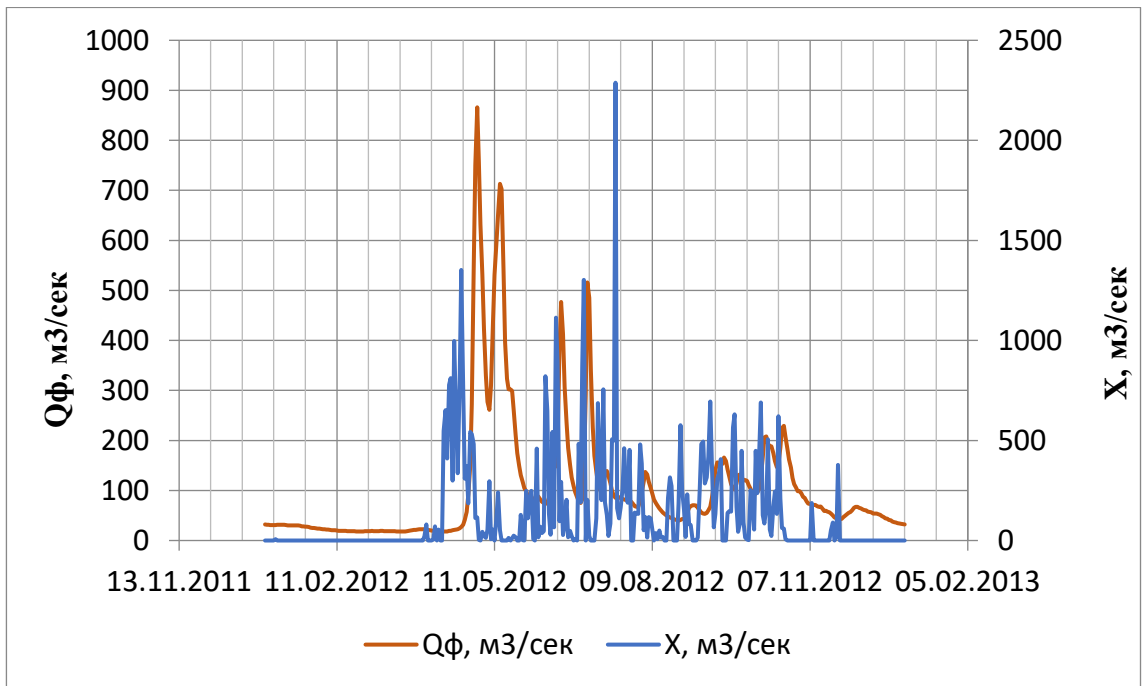
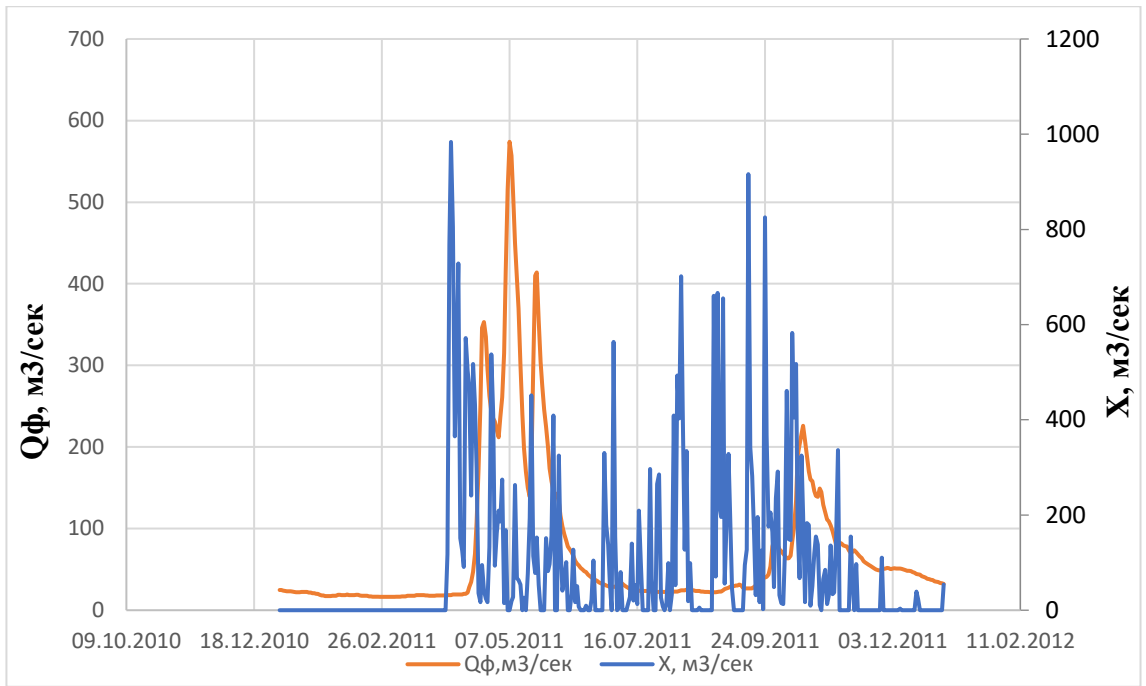


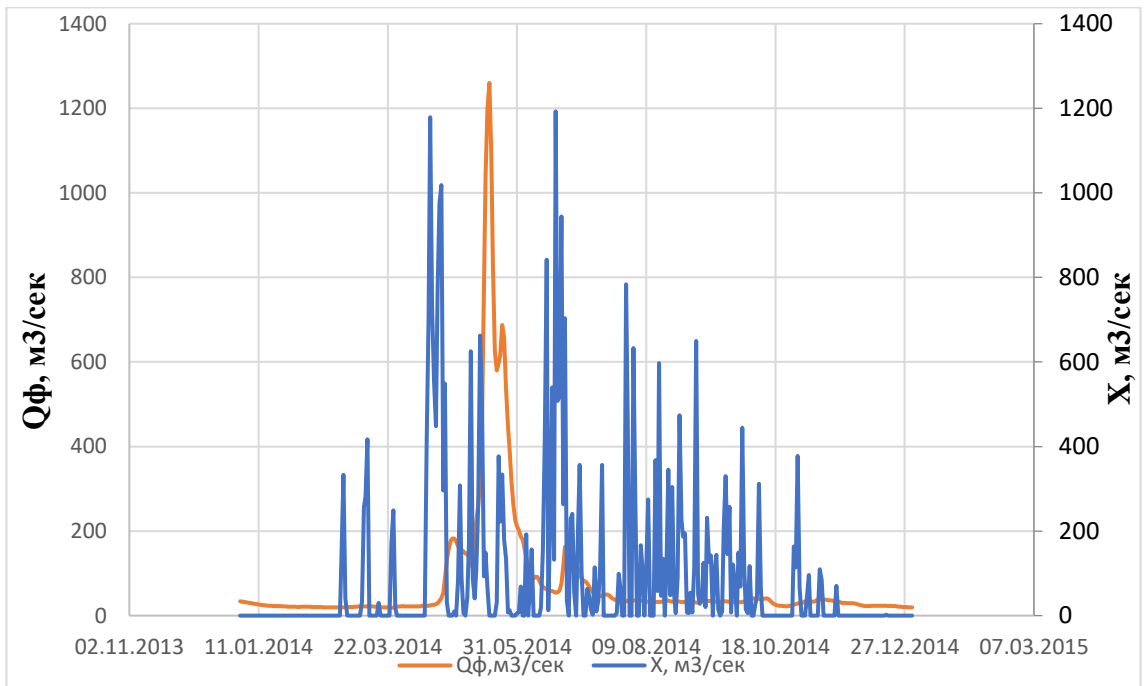
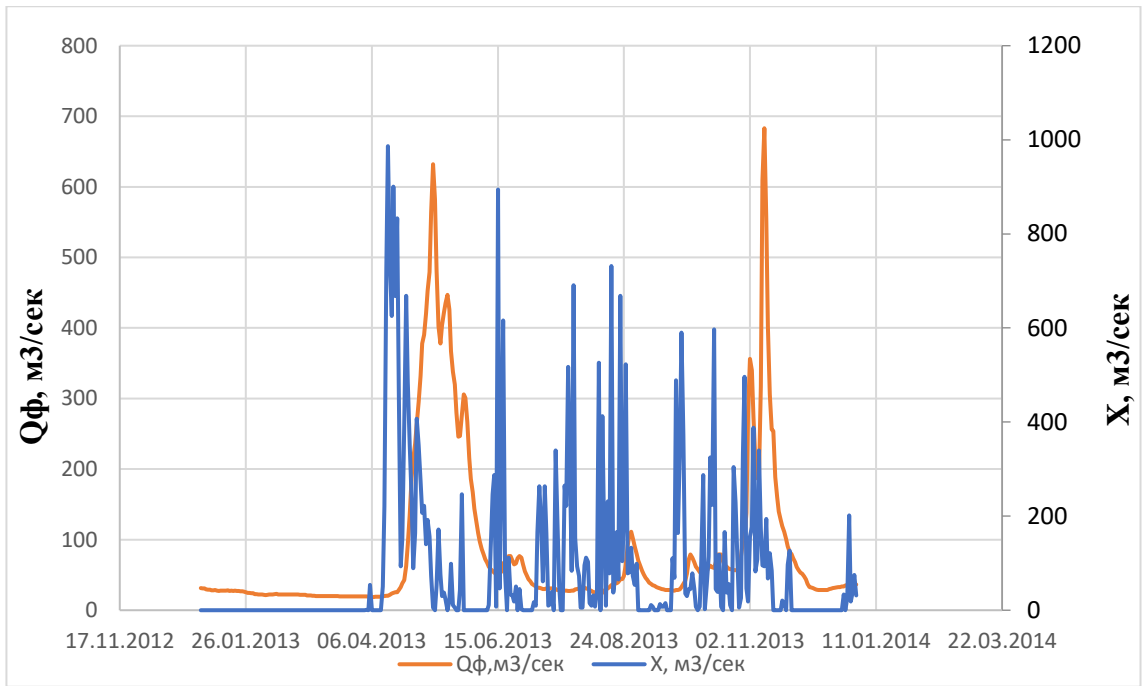


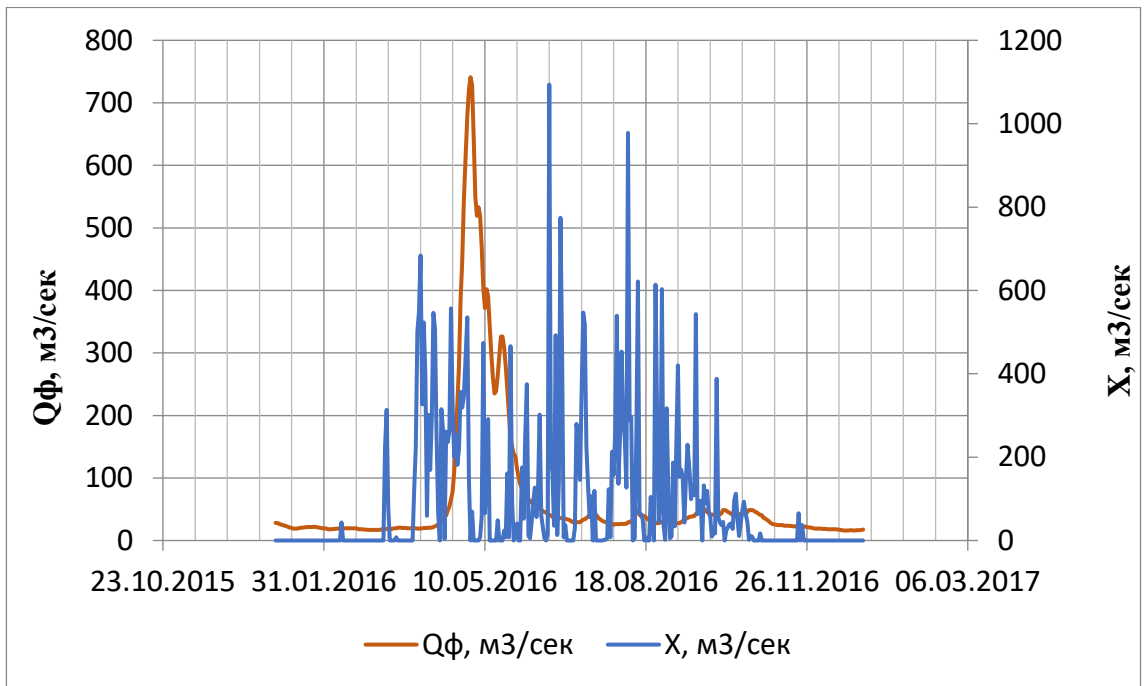
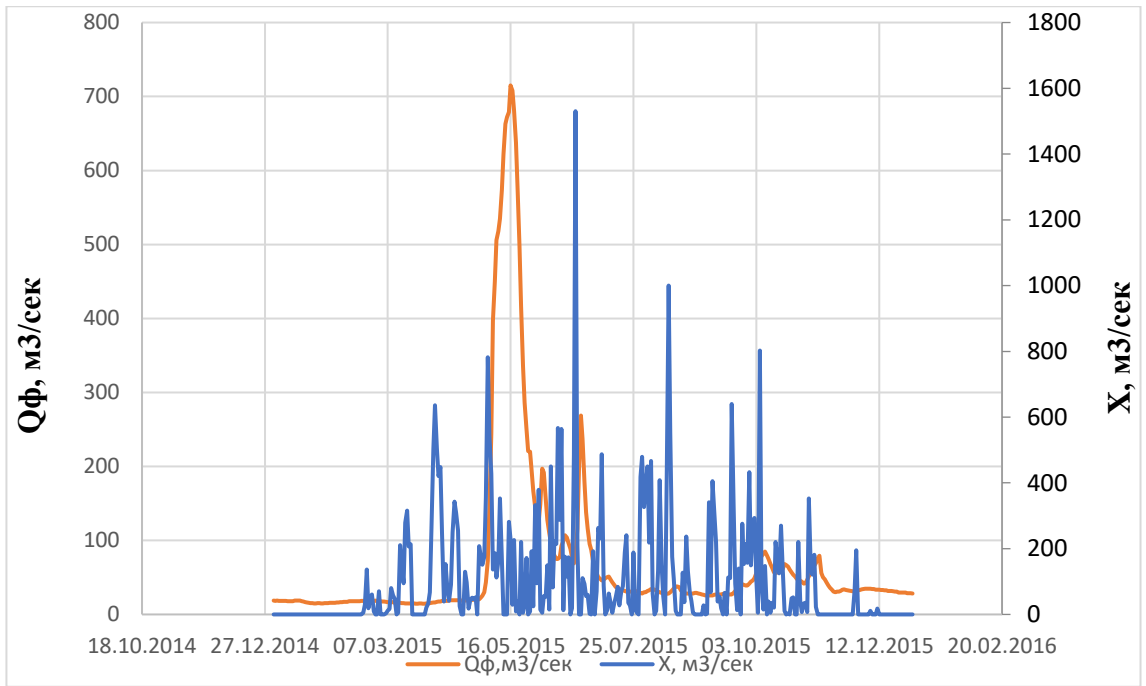


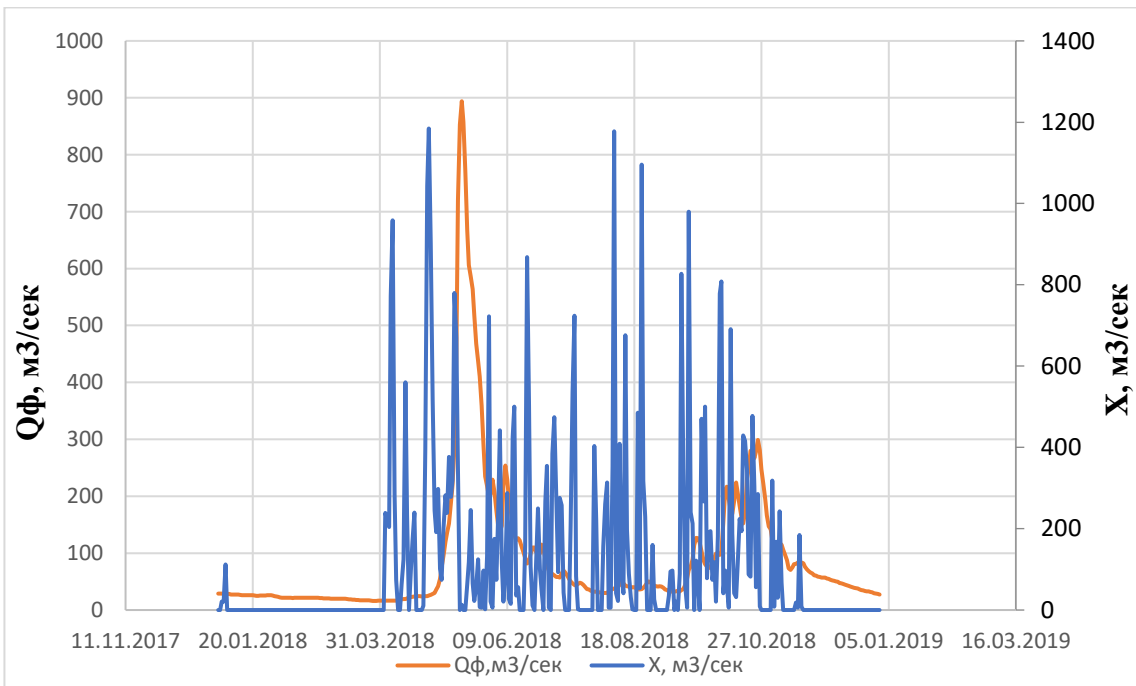
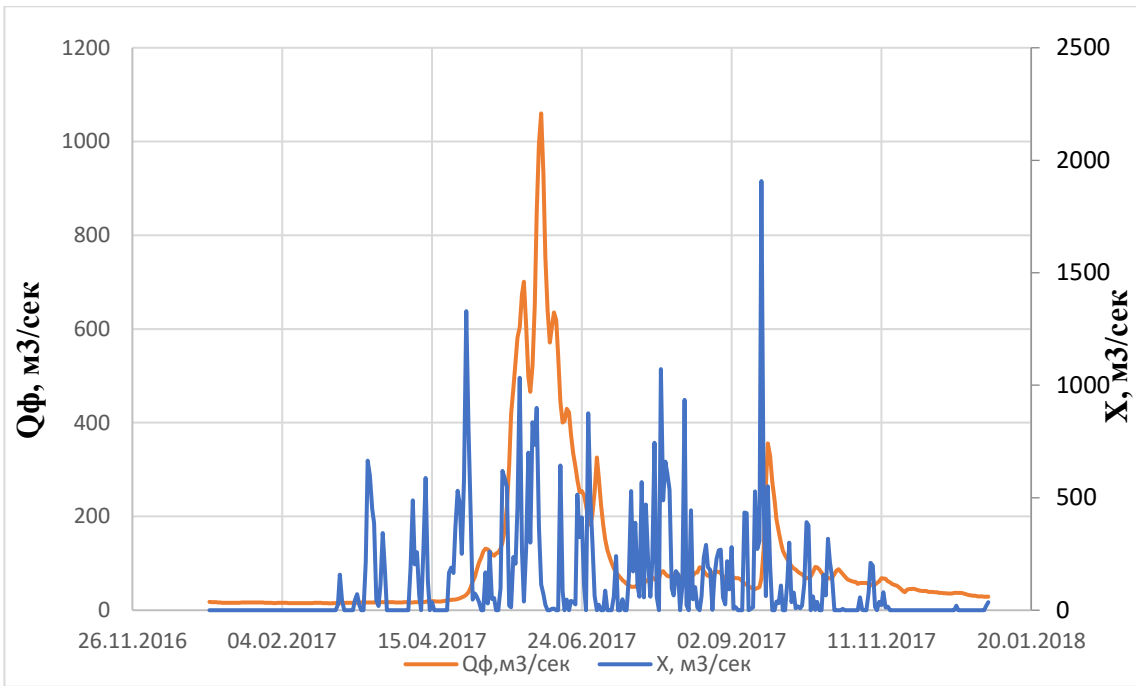
Приложение В – Хронологический график хода фактических расходов воды и водоотдачи на водосбор за период с 2009 по 2020 г. по гидропосту Макариб

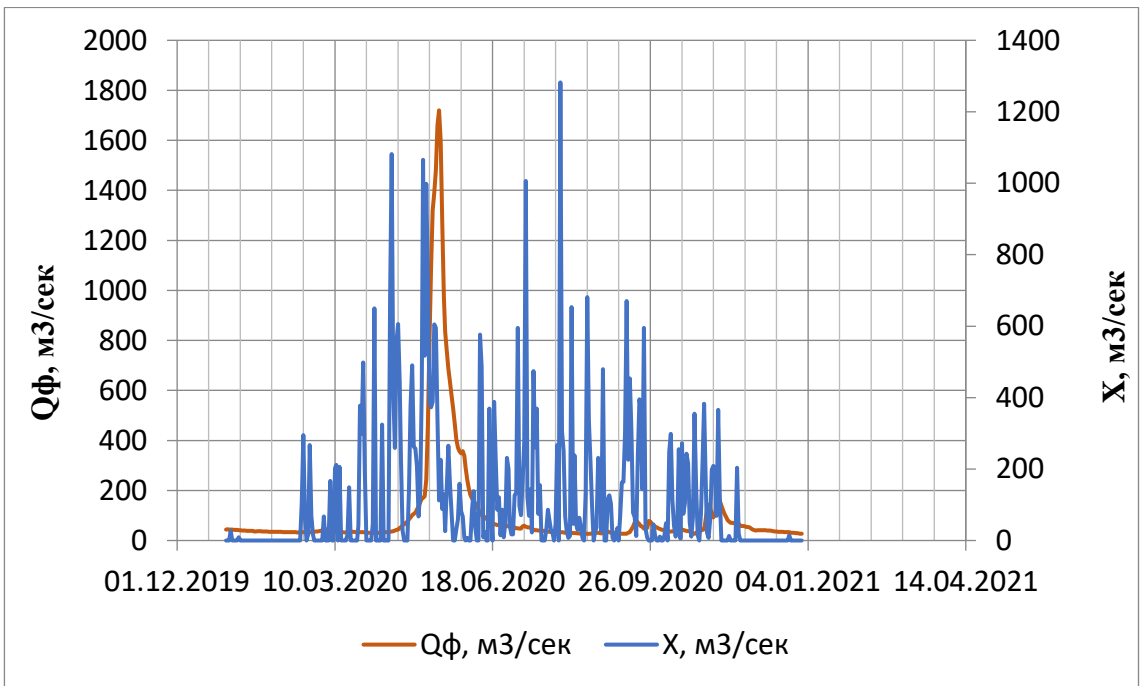
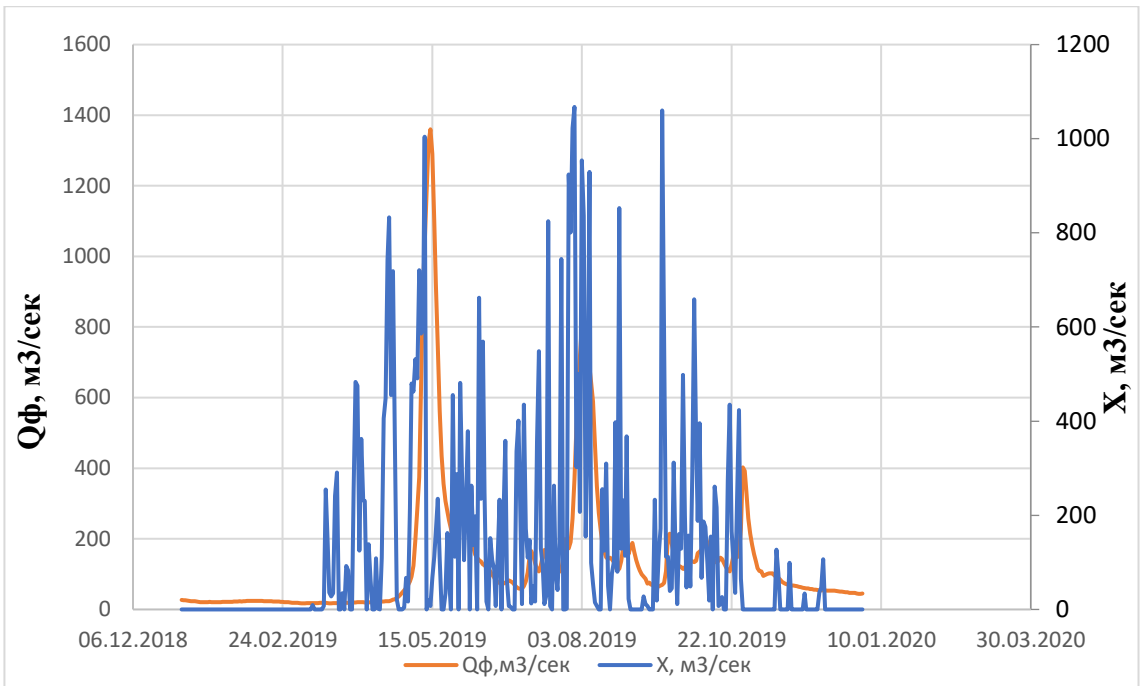












Приложение Г – Графики сравнения фактических и прогнозных расходов воды по гидропосту Макариб с 2009 по 2020 г.

