



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 **Системное математическое
моделирование гидрологических
процессов (на примере водосборов
озер Ильмень и Лача)**

Исполнитель Котова Софья Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«29» мая 2025г.

Санкт-Петербург
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Физико-географическое описание объекта исследования	6
1.1 Физико-географическое описание озера Лача	6
1.1.1 Общие сведения	6
1.1.2 Географическое описание	7
1.1.3 Климат	7
1.1.4 Температура воздуха	7
1.1.5 Осадки	8
1.1.6 Ветер	8
1.1.7 Растительность	10
1.1.8 Гидрологический режим и ледовые явления	10
1.2 Физико-географическое описание озера Ильмень	11
1.2.1 Общие сведения	11
1.2.2 Географическое описание	12
1.2.3 Климат	13
1.2.4 Температура воздуха	13
1.2.5 Осадки	13
1.2.6 Ветер	14
1.2.7 Растительность	14
1.2.8 Гидрологический режим и ледовые явления	15
2 Математический аппарат	18
2.1 Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдачи	21
2.2 Модель формирования стока	23
2.3 Модель водоема	24
2.4 Модель руслового стока	25
2.5 Оценка методики прогнозирования	26
3 Моделирование гидрологических объектов	27
3.1 Объекты озера Лача	27
3.1.1 Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдачи	27
3.1.2 Модель формирования стока реки	33
3.1.3 Модель озера Лача	39

3.1.4 Модель руслового стока реки Онега.....	44
3.2 Объекты озера Ильмень	45
3.2.1 Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдачи.....	45
3.2.2 Модель формирования стока реки Ловать	51
3.2.3 Модель озера Ильмень	52
Заключение	55
Список использованных источников.....	56
Приложение 1 Хронологические графики фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2007 по 2021 г.....	58
Приложение 2 Хронологические графики фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2007 по 2019 г.....	64
Приложение 3 Графики параметризации расходов воды за холодный период на р. Ловать – п. Холм с 2008 по 2019 г и апробации модели формирования стока за 2018 и 2019 гг.	70
Приложение 4 Графики параметризации уровней воды за холодный период на оз. Ильмень – пост. Коростынь с 2008 по 2019 г. и апробации модели водоема за 2018 и 2019 гг.	76
Приложение 5 Графики параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог с 2008 по 2022 г. и апробации модели руслового стока за 2020 – 2022 гг.	82

Введение

Все гидрологические процессы так или иначе можно рассматривать с разных точек зрения. Суть математического моделирования заключается в изучении этих процессов с точки зрения количественной оценки гидрологических явлений. Отсюда следует необходимость в использовании моделей, математических методов и формул. При таком подходе открывается большая возможность проникновения в глубь явлений, но уже на качественно более высоком уровне. Благодаря математическому моделированию можно делать гидрологические «открытия», взаимодействуя непосредственно не с самим природным объектом, а с его математической моделью.

В настоящее время климат очень переменчив и динамичен. В связи с этим математическое моделирование и прогнозирование гидрологических процессов приобретает особую значимость в условиях непрерывных изменений климата. Прогнозы различных видов речного стока позволяют рационально использовать водные ресурсы и вовремя организовывать защитные мероприятия от вредного воздействия вод и чрезвычайных ситуаций.

При помощи методов математического моделирования можно выполнять не только оценку, но и прогноз того или иного гидрологического явления с определенной заблаговременностью. Но для того, чтобы описать все процессы одной системы мало одного уравнения. Существует понятие составных моделей, стыковка которых происходит на границах частных систем.

Объектами исследования в данной работе являются озеро Ильмень, находящееся в западной части Новгородской области и озеро Лача на юго-западе Архангельской области. В качестве исходных данных, необходимых для выполнения поставленных задач, были использованы данные о наблюдении за количеством выпавших осадков, температурой воздуха, фактических запасов воды в снежном покрове на метеостанциях водосборов озер, значения водоотдачи, значения наблюдаемых расходов и уровни воды

озер и рек, впадающих в эти озера. Чтобы проанализировать и оценить многолетнюю изменчивость, а также произвести расчеты были использованы ежедневные значения метеорологических и гидрологических характеристик.

Главной целью данной работы является системное математическое моделирование гидрологических процессов. Основные задачи работы: исследование физико-географических особенностей озер Ильмень и Лача, сбор исходных метеорологических и гидрологических данных, параметризация моделей по многолетним данным, апробация методик прогнозирования на независимом материале и оценка их оправдываемости.

1 Физико-географическое описание объекта исследования

1.1 Физико-географическое описание озера Лача

1.1.1 Общие сведения

Озеро Лача (Рисунок 1.1.1) находится в Каргопольском районе на юго-западе Архангельской области. Озеро вытянуто с севера на юг на 33 км. Объём воды составляет 0,54 км³. Площадь поверхности водоема — 334 км². Лача считается самым большим озером и главным пресноводным промысловым водоёмом Архангельской области. Высота над уровнем моря — 117 м. Средняя ширина - 10 км, а максимальная ширина - 14 км. Средняя глубина составляет 1,3 м, а максимальная — 5 м [4].



Рисунок 1.1.1 – Карта бассейна реки Онега

1.1.2 Географическое описание

Северная часть озера более мелководна, чем южная. Наибольшие глубины расположены вдоль всего восточного берега и также вдоль западного в южной части. Берега неизрезанные, заболоченные, дно торфянистое. Озеро возникло на месте приледниковых водоёмов в пределах юго-восточного склона Балтийского щита. Озеро судоходно. Общая залесенность бассейна составляет 76%, а заболоченность бассейна - 15 %.

Озеро принимает в себя 9 притоков длиной более 10 км: Кинема, Ковжа, Лекшма, Петеньга, Свидь, Тихманьга, Ухта, Корма, Шоршма. В озеро впадает также ряд более коротких притоков: Ольга, Ольженица и другие.

Из северной оконечности вытекает река Онега, на которой, в 5 км от истока, стоит город Каргополь. Средний многолетний годовой сток реки вблизи истока 120 м³/с.

В среднем в течение года реки приносят в озеро 3,61 км³ воды, из этого объёма на весну приходится около половины, на лето — 16 %, на осень — 21 %, на зиму — 12 %. Осадки прибавляют к поверхностному притоку 0,27 км³ (7,2 % от общего поступления воды в озеро). Средний годовой сток из озера составляет 3,72 км³, среднее годовое испарение воды 0,14 км³ (5,6 % общего расхода). Береговая линия плавно очерчена, за исключением юго-западной части [4].

1.1.3 Климат

Климат на территории озера умеренно континентальный. Ему характерно прохладное лето и длинная холодная зима, а также частая смена воздушных масс и неустойчивость погоды. Самые теплые месяцы — июль и август. Озеро находится в зоне избыточного увлажнения [4][5].

1.1.4 Температура воздуха

На территории бассейна озера наблюдаются значительные сезонные колебания температуры. Максимальная среднесуточная температура — выше 15 °С. Минимальная — ниже -5 °С. Теплый сезон длится 3,4

месяца. Холодный — 3,7 месяца. Самый холодный месяц — январь, со средним температурным максимумом -17 °С и минимумом -11 °С [5].

1.1.5 Осадки

Среднегодовое количество осадков составляет 711 мм. Максимум осадков приходится на август - 77 мм, а минимум на февраль - 41 мм. Средняя годовая амплитуда осадков на озере Лаца составляет от 34 до 40 мм [4].

1.1.6 Ветер

Преобладающее направление ветра над озером — южные и юго-западные, в период с мая по август несколько возрастает повторяемость северных и северо-восточных ветров.

Среднегодовая скорость ветра составляет 2,6 м/с (Таблица 1.1.6.1). В течение всего года в районе исследования доминируют ветры южного направления (Таблица 1.1.6.3). Максимальная скорость ветра по данным м.ст. Каргополь составляет 35 м/с (Таблица 1.1.6.2). Роза ветров представлена ниже на рисунке 1.1.6.1.

Таблица 1.1.6.1 – Средняя месячная и годовая скорость ветра (м/с), м.ст. Каргополь (1977–2024 гг.)

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2,8	2,8	2,8	2,5	2,6	2,3	2,1	2,1	2,3	2,8	2,9	2,9	2,6

Таблица 1.1.6.2 – Максимальная скорость ветра (м/с), м.ст. Каргополь (1977–2024 гг.)

Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
5,0	5,2	13	26	32	35	34	33	26	20	10	7,6	35

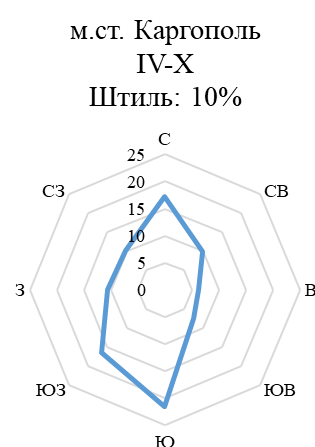
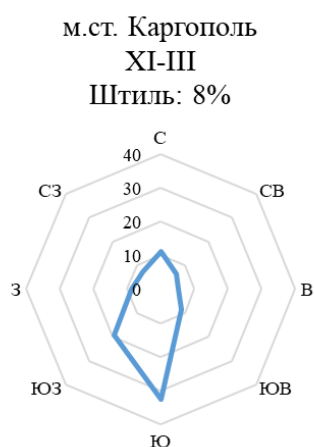
Таблица 1.1.6.3 – Повторяемость направления ветра и штилей по месяцам, м.ст. Каргополь (1977–2024 гг.)

Месяц	Повторяемость напр., %								Штиль
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
I	12	6	5	9	34	19	9	7	9
II	13	7	5	9	33	17	9	7	8

Месяц	Повторяемость напр., %								Штиль
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
III	12	7	5	9	31	20	9	8	8
IV	17	10	6	8	25	16	9	9	10
V	20	11	7	7	19	14	11	12	10
VI	20	12	6	7	17	15	11	11	11
VII	21	11	7	9	19	15	9	10	13
VIII	18	10	7	8	21	15	11	10	12
IX	14	9	6	8	23	18	11	10	10
X	10	5	5	8	28	22	12	11	5
XI	10	7	6	8	32	21	9	8	6
XII	9	6	5	9	35	20	8	7	7
Год	15	8	6	8	26	18	10	9	9
Год (сильные ветра более 15 м/с)	14	12	13	12	12	12	13	13	—

Таблица **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..1.6.4**
– Число дней с сильным ветром (более 15 м/с), м.ст. Каргополь (1977–
2024 гг.)

Характеристи ка	Месяц												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VI I	VII I	IX	X	XI	XII	
Среднее	2, 3	4, 1	2, 4	3, 1	2, 8	2, 5	1,3	1,1	2, 4	3, 4	3, 8	1,9 5	9,5 1
Наибольшее	7	9	7	10	13	8	3	2	6	15	15	4	34



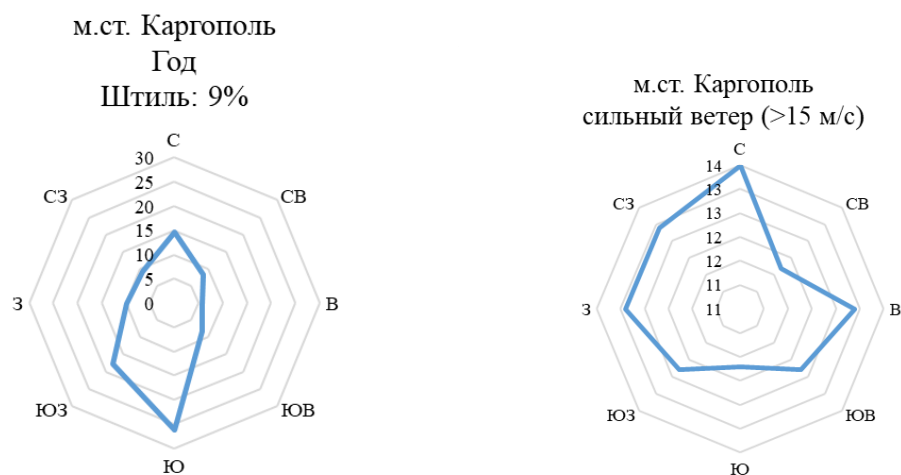


Рисунок 1.1.6.1 – Повторяемость (%) направлений ветра (Роза ветров)

1.1.7 Растительность

Озеро Лача находится в зоне среднетаежных лесов. Юго-западная часть акватории водоема занята Каргопольским лесом. Преобладают берёзовые, осиновые, сосновые, ивовые и ольховые насаждения. Эта территория входит в границы Лачского государственного природного биологического заказника регионального значения. Заказник создан для сохранения природного комплекса озера и леса, и на его территории запрещена любая хозяйственная деятельность, в том числе охота и лов рыбы сетями [4][5].

1.1.8 Гидрологический режим и ледовые явления

Основной источник питания озера — дождевые воды (20–30%), снеговые талые воды (60–70%), а также подземные воды (10–20%). В зависимости от режима впадающих в озеро рек, годовая амплитуда уровней изменяется от 0,8 до 2,7 м. Весной озеро сильно разливается, затапливая прибрежную местность на северо-восточной стороне на расстояние до 500–600 м, а на западе — до 800 м. При этом уровень воды в нём поднимается над средним годовым на 2 м и более.

Озеро мелководное, для него характерно ветровое перемешивание и большое количество донных отложений отмершей водной растительности. Донный ил накапливает тепло в течение летнего периода и отдаёт его зимой.

Разница температур воды между поверхностными и придонными слоями в марте составляет 1,5—2 °С.

Лёд на озере встаёт в конце октября. Продолжительность ледоставного периода примерно 150—180 дней. К концу марта толщина ледового покрова составляет 60—80 сантиметров. К весне уровень воды опускается и лёд до 30 % поверхности ложится на грунт. В первой половине мая озеро очищается ото льда, талые воды увеличивают уровень воды до 15 см в сутки. В апреле-мае озеро наиболее полноводно, в среднем на 1,3 метра выше мартовского минимума, его площадь становится в 1,3 раза больше. Среднемесячная температура воды в мае составляет 7,9 °С. [4].

1.2 Физико-географическое описание озера Ильмень

1.2.1 Общие сведения

Озеро Ильмень находится в западной части Новгородской области. Оно относится к водосборному бассейну Балтийского моря. Площадь озера — 982 км². Длина около 45 км, а ширина до 35 км. Глубина водоема до 10 м. Водосборная площадь озера— 67 200 км². Высота над уровнем моря — 18,1 м. Объём воды — 2,85 км³ [6].



Рисунок 1.2.1 – Карта бассейна озера Ильмень

1.2.2 Географическое описание

Берега озера в основном заболоченные, низменные, местами — дельтовые, с множеством плоских пойменных островов и проток. Вдоль северо-западного берега вытянуты гряды, чередующиеся с впадинами. На юго-востоке и востоке болотисты.

В озеро Ильмень впадает около 50 рек. Наиболее крупные из них: Мста, Пола, Ловать с Полистью, Шелонь с Мшагой, Веронда, Веряжа. Из озера Ильмень вытекает одна единственная река Волхов, впадающая в Ладожское озеро.

Питание озера в основном осуществляется за счёт притока рек с весенним половодьем и зимней меженью. Уровни воды колеблются до 7,4 м. Минимальный уровень наблюдается в марте, а максимальный — в мае. Ледостав на озере длится с ноября по апрель.

Озеро богато рыбой: налим, щука, лещ, снеток. В озёрной воде содержится много органических веществ, из-за чего вода имеет желтоватую окраску. Ильмень входит в Вышневолоцкую водную систему [6].

1.2.3 Климат

Климат на территории озера характеризуется относительно теплым летом и продолжительной зимой с частыми оттепелями. Озеро Ильмень находится в зоне избыточного увлажнения [6].

1.2.4 Температура воздуха

Средняя годовая температура воздуха на территории бассейна колеблется в пределах 3-4°C. Самым теплым месяцем в году является июль, а самыми холодными - январь и февраль.

Зима начинается во второй декаде ноября. Первая половина зимы, характеризуется преобладанием пасмурной погоды с выпадением дождя и мокрого снега.

Лето наступает в первой декаде мая. За начало лета принимается переход средней суточной температуры воздуха через 10°C. В самом начале лета возможны заморозки. Раньше всего они прекращаются на побережье озера. К концу мая они заканчиваются повсеместно [7].

1.2.5 Осадки

На распределение осадков влияют в первую очередь орографические особенности местности и подстилающая поверхность. Именно эти факторы приводят к тому, что изменение осадков происходит неравномерно. Даже небольшие возвышенности обуславливают перераспределение осадков. За целый год в бассейне озера Ильмень в среднем выпадает 700-800 мм осадков.

Внутри года осадки распределяются неравномерно. Характер их распределения по территории в теплый и холодный период имеет много общего с годовым, однако в теплый период года влияние возвышенностей на перераспределение более заметно, нежели в холодный период. Максимум

осадков приходится на июль-август и лишь иногда на сентябрь. Количество осадков за теплый период колеблется от 450 до 550 мм. Осадки холодного периода составляют 40-45 % годовых [8].

1.2.6 Ветер

В течение всего года над озером преобладают ветры в основном южного, западного и юго-западного направлений. Наибольшая скорость в осенне-зимний период доходит до 5 – 6 м/с. Повторяемость этих направлений превышает 50 %. При этом они особенно отличаются в холодный период года.

Под влиянием орографии преобладающее направление ветра искажается. В долинах рек преобладают ветры, дующие вдоль долин. Еще в большей степени, чем направление, от местных условий зависит скорость ветра. Наименьшие скорости наблюдаются в районах, где сказывается влияние леса, по мере приближению к озеру скорость ветра возрастает и наибольшие ее величины отмечаются на прибрежных и озерных станциях. Максимальные скорости ветра наблюдаются в октябре-феврале, а наименьшие в июле-августе.

В летние месяцы повторяемость ветров юго-западной четверти несколько уменьшается, северной увеличивается. В холодный период, вследствие близкого расположения областей высокого и низкого давлений, возникают большие горизонтальные градиенты давления. Поэтому в это время ветры наиболее устойчивы по направлению и наибольшие по силе. Летом, в связи с уменьшением термических контрастов, барическое поле выражено менее четко, а градиенты давления незначительны. Ветры у поверхности ослабевают и становятся менее устойчивы по направлению [7][9].

1.2.7 Растительность

Озеро Ильмень находится в южной подзоне тайги. Сам бассейн озера расположен в зоне смешанных хвойных и широколиственных лесов. Преобладающим типом растительности являются леса, состоящие главным образом из хвойных пород - ели и сосны. Раньше на территории преобладали

еловые леса с примесью широколиственных пород – дуба, липы и других. На богатых почвах были распространены дубняки, а на песчаных – сосновые боры. Но после вырубки многие коренные леса замещены вторичными мелколиственными – березой и осиной. Большие площади заняли кустарник.

Особенно изменена растительность деятельностью человека в южном Приильменье, а также по берегам реки Мсты, в некоторых районах Валдайской возвышенности.

Степень залесенности бассейна составляет от 30 до 50 %. В южных и западных районах - отмечается наименьшая лесистость. Так в верхнем и среднем течении реки Ловати, в бассейне реки Шелонь, залесенность 30%. Болота и заболоченные территории занимают около 30 % бассейна. Под лугами находится менее 10 % площади бассейна. Большинство лугов суходольные со злаково-разнотравной растительностью (душистый колосок, щучка, белоус, мятлик луговой, полевица, манжетка, различные виды клевера) [8][9].

1.2.8 Гидрологический режим и ледовые явления

Питание озера осуществляется в основном за счет 50-ти рек и несколько сотен мелких ручьёв. Реки являются главным источником поступления воды в озеро, который составляет 90% всего прихода воды в этот водоем. К самым крупным водотокам относятся реки: Мста, Ловать, Шелонь и Пола – они дают озеру 13–40% воды от своего годового расхода. Более половины стока рек бассейна Ильменя приходится на весну – 57%, осень – 18%, зиму – 17% и лето – 8%. Пик приходится на весенний период, когда наступает половодье, минимум фиксируется зимой, когда наступает межень. Но в целом озеро расположено в зоне избыточного увлажнения. Котловина озера расположена в Приильменской низменности, которая периодически затопливается водами озера. Особенно большие площади затоплений приходятся на дельтовые участки рек Мсты и Ловати. При этом меняются и запасы воды в озере от 1,5 км³ до 11,6 км³.

Озеро относится к сточным водоемам, и является проточным озером. Вода в нем может обновляться за два месяца. Но воду в данном водоеме нельзя считать идеально чистой, хотя это характерно для проточных озёр.

Волхов – единственная вытекающая река, которая берет своё начало в северной оконечности озера, – на нее приходится вся расходная часть водного баланса Ильменя.

Для озера Ильмень характерны серьезные колебания уровня воды. Абсолютный максимум фиксировался в 1922 году, он составил 7,91 метра, при этом абсолютный минимум в 1882 году имел отметку 0,51 метра. Таким образом, максимальный перепад уровня воды составил 7,4 метра. Однако значения выше 7 метров бывают довольно редко, а критическим считается уровень выше 6,7 метров, при котором происходит затопление ряда окрестных населенных пунктов.

Ледостав на озере происходит с ноября по апрель. Ильмень обычно замерзает в ноябре, освобождается ото льда в апреле, но в отдельные года сроки могут сдвигаться, иногда озеро замерзает к середине декабря. В первую очередь замерзают прибрежные и мелководные участки. В тихую морозную погоду поверхность его быстро схватывается льдом, толщина которого впервые же сутки достигает 5 – 6 см. Толщина льда к началу января обычно достигает 30-32 сантиметров, максимум наблюдается в марте – более 60 сантиметров. Однако из-за ветров может происходить разрушение ледяного покрова, что приводит к тому, что на разных участках может быть разная толщина льда.

Если ледяной покров успевает достигнуть 15 – 18 см, ветру его уже не взломать. Но так бывает нечасто. В осенне-зимнее время на Ильмене часто дуют южные и юго-западные ветры. Они задерживают ледостав, вызывая переохлаждение воды, они еще способствуют образованию в озере внутриводного льда. В истоке Волхова накопления внутриводного льда вызывают зажоры.

Зимой из-за температурных перепадов воздуха в ледяном покрове Ильменя появляются трещины, идущие в различных направлениях, а в центральной части озера образуется кольцевая щель. В сильные морозы, когда лед сжимается, щель расширяется, при повышении температуры она делается уже.

Освобождается Ильмень ото льда, как и замерзает, в разных местах одновременно. По многолетним наблюдениям, вначале обычно в первых числах апреля вскрывается его северо-восточная часть у деревни Войцы, затем через 6–7 дней происходит вскрытие в районе устьев крупных рек и с опозданием 2–3 дня в остальных его частях. В центральной части может остаться обширное ледяное поле, которое может существовать до середины или даже конца мая, постепенно уменьшаясь в размерах. Оторвавшись от берегов, ледяное поле долго еще, порой недели 2 – 3 «гуляет» по воде. В среднем период от вскрытия до очищения ото льда Ильменя занимает 14 – 19 дней, а иногда он длится до 30 дней. Из-за низких берегов и обширной поверхности озеро Ильмень подвержено сильному действию ветров. Ветрами на озере создается значительное волнение, причем при низком стоянии уровня воды происходит взмучивание ила со дна. Особой высоты (свыше 2м) достигают волны прибоя у высоких юго-западных берегов в высокие разливы; в такие моменты происходит разрушение уступа юго-западного и западного берегов. Насколько велика сила прибойных волн, свидетельствует крупный материал, отлагаемый в прибой на юго-западном берегу [6][8].

2 Математический аппарат

Большое множество гидрологических процессов не возможно полностью описать без математического аппарата. Но математические модели помимо решения вопросов диагностического характера, также решают и прогностические задачи. Так как любой метод прогнозирования гидрологических явлений опирается на физический анализ процессов, который лежит в их основе, то точность итоговой информации определяется, в первую очередь, качеством исходного анализируемого материала.

На рисунке 2.1 наглядно представлены модели основных гидрологических процессов: склоновый сток, русловой сток, водоём, зона аэрации (ненасыщенная зона), насыщенная зона и напорные горизонты. В данной работе ко всем выше перечисленным моделям добавляется еще и модель формирования запасов воды в снежном покрове и водоотдачи.

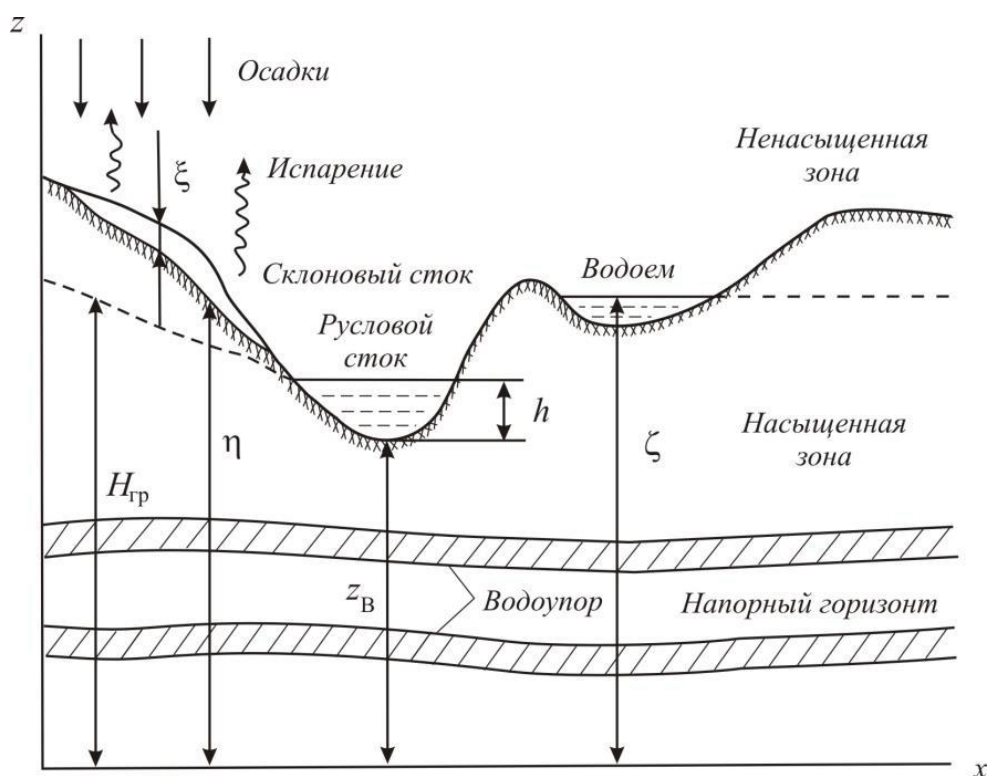


Рисунок 2.1 - Основные звенья гидрологического цикла.

В приземном слое атмосферы формируются осадки, которые оказывают внешнее воздействие на водосбор вместе с другими метеорологическими факторами. Выпавшие осадки формируют склоновый сток, который, поступая

в русловую сеть, трансформируется в русловой. Часть выпавших осадков испаряется, часть инфильтруется в почву, подпитывая ненасыщенную зону. Уровень грунтовых вод определяется взаимодействием насыщенной и ненасыщенной зон, положением напорного горизонта и русловым стоком [3].

В данной работе осуществляется переход от абстрактной модели с постоянным значением площади водосбора к расчетам по фактическим данным.

Для определения и прогноза уровней воды мало знать значения температур, количества осадков, уровней и расходов, поступающих в водоем, необходимых для моделей водоема и формирования стока. Запасы воды, поступающие из снежного покрова оказывают прямое влияние на сток, хоть и не учитываются на некоторых этапах моделирования.

Ниже представлены использованные в работе гидрологические (Таблица 2.1) и метеорологические (Таблица 2.2) посты.

Таблица 2.1 – Гидрологические посты (озеро Лача)

№	Реки впадающие в оз. Лача	Географические координаты, град		Наименование поста	Код поста	Расстояние от устья, км
		сев. широта	вост. долгота			
1	Онега	61°30′	38°58′	г.Каргополь	7000 1	408
2	Онега	61°56′	39°01′	д.Надпорожский Погост	7000 2	400
3	Онега	62°55′	39°91′	д.Казаково	7000 7	229
4	Онега	63°11′	39°23′	д.Турчасово	7001 1	143
5	Онега	63°49′	38°28′	с.Порог	7084 2	31

Таблица 2.2 – Гидрологические посты (озеро Ильмень)

Код поста	Водный объект	Название поста	Расстояние от устья, км	Координаты	
				с.ш.	в.д.
72281	р. Мста	д. Девкино	84	58°35'50"	32°11'28"
72423	р. Пола	д. Налючи	68	57°49'39"	31°52'11"
72459	р. Ловать	г. Холм	193	57°9'20"	31°10'51"
72510	р. Шелонь	д. Заполье	59	58°30'	30°56'
72760	р. Полисть	д. Утушкино	41	57°54'45"	31°17'4"

Таблица 2.3 – Метеорологические посты (озеро Лача)

Код поста	Наименование	Координаты	
		с. ш.	в. д.
22845	г. Каргополь	61°52'0"	38°93'0"

Таблица 2.4 – Метеорологические посты (озеро Ильмень)

Код поста	Наименование	Координаты	
		с. ш.	в. д.
26275	г. Старая Русса	58°01'0"	31°19'0"

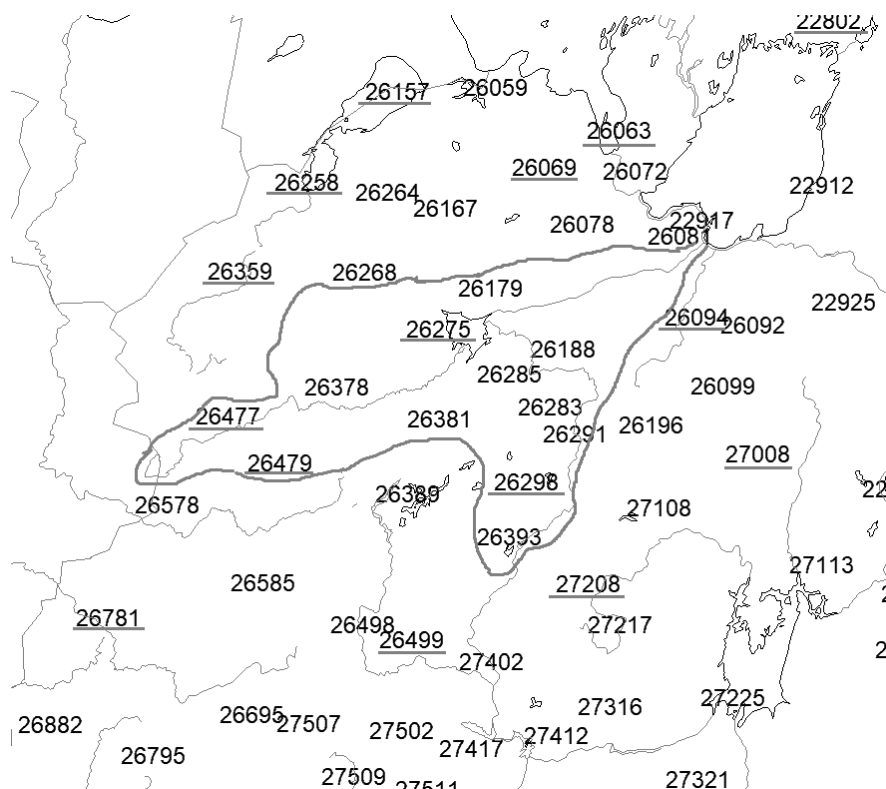


Рисунок 2.2 – Схема расположения метеостанций (озеро Илимь)



Рисунок 2.3 – Схема расположения метеостанций (озеро Лача)

2.1 Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдачи

Модели расчета талого стока обычно включают в себя два компонента: модель снеготаяния и функцию преобразования. Модель снеготаяния определяет объем воды, который будет доступен для стока, а функция преобразования - пересчитывает воду на поверхности земли в сток

на выходе из бассейна. Модель снеготаяния и модель преобразования могут быть как со сосредоточенными, так и с распределенными параметрами.

Снежный покров может быть представлен, как однослойным, так и многослойным. В основе определения сроков снеготаяния лежит влагоудерживающая способность. Для определения периодов снеготаяния и объемов стаявшего снега за определенные периоды времени используются различные индексы. Данные измерения снежного покрова используются для улучшения прогнозов сезонного стока, полученных по концептуальным моделям. Основным входным параметром являются осадки, но также в качестве дополнительных параметров могут быть использованы данные измерений запасов воды в снежном покрове.

В горных районах данные наблюдений часто подвержены влиянию местных факторов, включая ветер, уклоны и экспозицию склонов. Поэтому данные должны корректироваться с целью лучшего представления ими средних метеорологических условий.

Самый простой способ учета снежного покрова при расчете стока – это представление его в виде снежного покрова, имеющего постоянную высоту и полностью покрывающего всю площадь. Площадь распределения снежного покрова может быть обобщена в форме кривой распределения площадей, которая суммирует состояние снежного покрова на данный момент времени в пределах бассейна.

Расчет интенсивности снеготаяния основан на тепловом балансе, который учитывает основные формы теплообмена. Тепло передается снегу путем поглощения прямой солнечной радиации, длинноволновой радиации. Для определения количества тепла, необходимого для снеготаяния Q_m , используется уравнение энергетического баланса:

$$Q_m = Q_n + Q_h + Q_e + Q_g + Q_a - \frac{dS_i}{dt}, \quad (2.1.1)$$

где Q_n – длинноволновая радиация

Q_h - разницы температур между поверхностью и атмосферой

Q_e - скрытый энергопоток в результате изменения водяного пара (выброс тепла при конденсации или его высвобождении при сублимации или испарении)

Q_g - поток тепла от подстилающей поверхности Q_a - адвекция тепла (дождь)

S_i - запас тепла в снеге [10].

Для расчета интенсивности снеготаяния необходимо учитывать множество факторов, которые влияют на тепловой баланс снежного покрова.

Общий вид модели:

$$\frac{dS}{dt} = kf \cdot X^{TB} + kt \cdot t^+; \quad (2.1.1)$$

$$S_{i+1} = S_i + kf \cdot X_i^{TB} + kt \cdot t_i^+$$

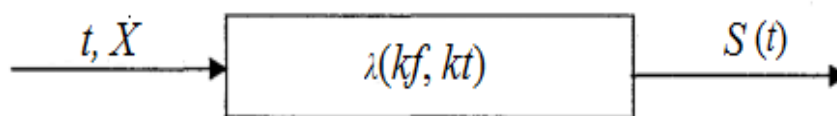


Рисунок – 2.1.1 Схема моделируемого объекта

2.2 Модель формирования стока

Одним из основных направлений развития гидрологии суши является моделирование процессов формирования стока. Модели формирования стока все чаще используются для решения теоретических и прикладных задач (прогнозная оценка изменений стока под влиянием изменений ландшафтов и климата, расчет гидрографов стока с неизученных бассейнов, оперативный краткосрочный и долгосрочный прогноз стока в разные фазы водного режима).

Параметры модели определяются по справочным, картографическим и литературным материалам. Уточнение параметров модели проводится по данным наблюдений на замыкающих створах водосборов, аналогичных по условиям формирования стока.

Результатом моделирования становится построение кривых распределения расходов воды, на настоящее время и при изменениях характеристик бассейнов [3][11].

Общий вид модели:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau} + \frac{k\dot{X}}{\tau} \quad (2.2.1)$$

$$\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t} = \frac{Q_i}{\tau} + \frac{k\dot{X}_i}{\tau}$$

$$\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t} = \frac{Q_i}{\tau} + \frac{k\dot{X}_i}{\tau}$$

$$\tau \frac{dQ}{dt} + Q = k\dot{X}$$

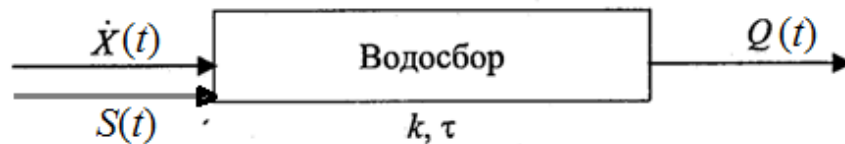


Рисунок – 2.2.1 Схема моделируемого объекта

2.3 Модель водоема

При изучении озёр возникают разнообразные задачи, связанные с внутренними процессами, которые в них происходят. Для того, чтобы их решить необходимо использовать довольно сложные уравнения. Но в данном случае можно ограничиться уравнением, которое учитывает только изменение уровня водоёма во времени, так как по уровням и морфометрическим данным водоёма можно легко найти изменение его объёма [3][11].

Общий вид модели:

$$\frac{dH}{dt} + k_{\text{морф}} H = \frac{Q_{\text{в}} + Q_{\text{л}} - Q_{\text{п}}}{F} \quad (2.3.1)$$

$$\frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta t} + k_{\text{морф}} H_i = \frac{Q_{\text{в}i} + Q_{\text{л}} - Q_{\text{п}}}{F}$$

$$H_{i+1} = \frac{Q_{\text{в}i} + Q_{\text{л}} - Q_{\text{п}}}{F} \Delta t - k_{\text{морф}} H_i \Delta t + H_i$$

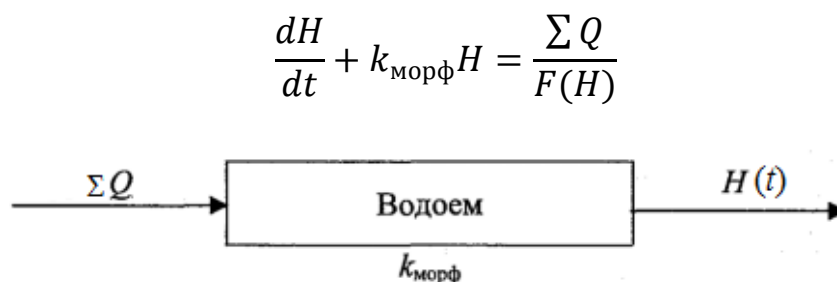


Рисунок – 2.3.1 Схема моделируемого объекта

2.4 Модель руслового стока

Одной из наиболее простых моделей движения воды в русле является модель кинематической волны. Несмотря на неустойчивый характер движения воды, описываемой этой моделью, связь расходов воды и уровней считается однозначной:

$$Q = f(F, x) \quad (2.4.1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t), \quad (2.4.2)$$

где Q — расход воды; f — площадь живого сечения; q — боковая приточность (это может быть и отток); x, t — продольная координата и время.

Подставляя первое уравнение во второе, можно получить модель кинематической волны:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial f(F, x)}{\partial x} = q(x, t) \quad (2.4.3)$$

Модель кинематической волны (2.4.3) является общей моделью руслового стока. Ею часто можно ограничиться при решении задач, связанных с количественным учетом стока в условиях плавно изменяющегося движения воды. Для более сложных гидравлических задач она неприемлема, так как в реальных условиях при неустойчивом и неравномерном движении связь $Q = f(F)$ неоднозначная [3][11].

Общий вид модели:

$$\frac{dH}{dt} + a \frac{\partial H}{\partial x} = q \quad (2.4.4)$$

$$\frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta t} + a \frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta x} = q_i$$

$$H_{i+1} = H_{i-1} - a \frac{\Delta t}{\Delta x} (H_i - H_{i-1}) + q_i \Delta t$$

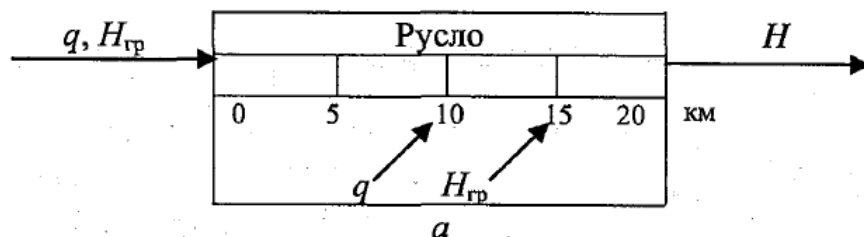


Рисунок – 2.4.1 Схема моделируемого объекта

2.5 Оценка методики прогнозирования

Если разработана методика прогнозов, значит есть необходимость в оценке ее точности и эффективности.

Точность методики оценивается по распределению величин погрешностей поверочных прогнозов или по их обеспеченности, то есть по величинам вероятности того, что погрешности прогнозов не превышают заданных предельных значений. Поверочные прогнозы - это совокупность прогнозов, составленных по разработанной методике по данным наблюдений за прошлые годы. Эта оценка точности методики исходит из предпосылки, что распределения погрешностей прогнозов, которые будут выпускаться в будущем, являются такими же, как и для поверочных прогнозов.

Данная методика может использоваться на практике, если она достаточно точная. Мерой ее точности служит среднеквадратическая погрешность поверочных прогнозов S , которая определяется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\phi} - Y_{\text{пр}})^2}{n - m}}, \quad (2.5.1)$$

где Y_{ϕ} - фактическое значение величины; $Y_{\text{пр}}$ - предсказанное значение; n – число членов ряда; m – число параметров в прогностическом уравнении, при использовании линейной зависимости (вида $y = ax + b$) $m = 2$.

За критерий применимости и качества методики принимается отношение S/σ или $S/\sigma\Delta$. Разница в том, что S/σ - это отношение среднеквадратической погрешности поверочных прогнозов к среднеквадратическому отклонению предсказываемой величины от среднего значения, а $S/\sigma\Delta$ - это отношение среднеквадратической погрешности поверочных прогнозов к ее изменению за период заблаговременности.

Методика прогноза считается практически приемлемой, если обеспеченность допустимой погрешности поверочных прогнозов не менее чем на 10 % превышает обеспеченность вероятного отклонения предсказываемой величины от среднего. Это означает, что при разной длине ряда n :

при $n \leq 15$ должно быть $S/\sigma\Delta \leq 0,70$;

при $15 < n \leq 25$ должно быть $S/\sigma\Delta \leq 0,75$;

при $n > 25$ должно быть $S/\sigma\Delta \leq 0,80$ [12].

3 Моделирование гидрологических объектов

3.1 Объекты озера Лача

3.1.1 Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдачи

В качестве исходных данных были использованы ежедневные данные приземной температуры воздуха (t , °C), осадков (X , мм), высота снежного покрова (h , см), фактических запасов воды в снежном покрове по материалам

маршрутных снегомерных съемок. В данной работе использованы метеорологические данные по метеостанции Каргополь за период 15 лет (2007 - 2022 гг.)

На этом этапе работы, по ежедневным данным осадков и расчетных запасов воды в снежном покрове (Таблица 3.1.1.1) – результат расчетов снегонакопления при устойчивом переходе через 0 °С – необходимо было рассчитать водоотдачу для всех лет наблюдений. В результате был получен хронологический график (Рисунок 3.1.1.1), представленный ниже в качестве примера.

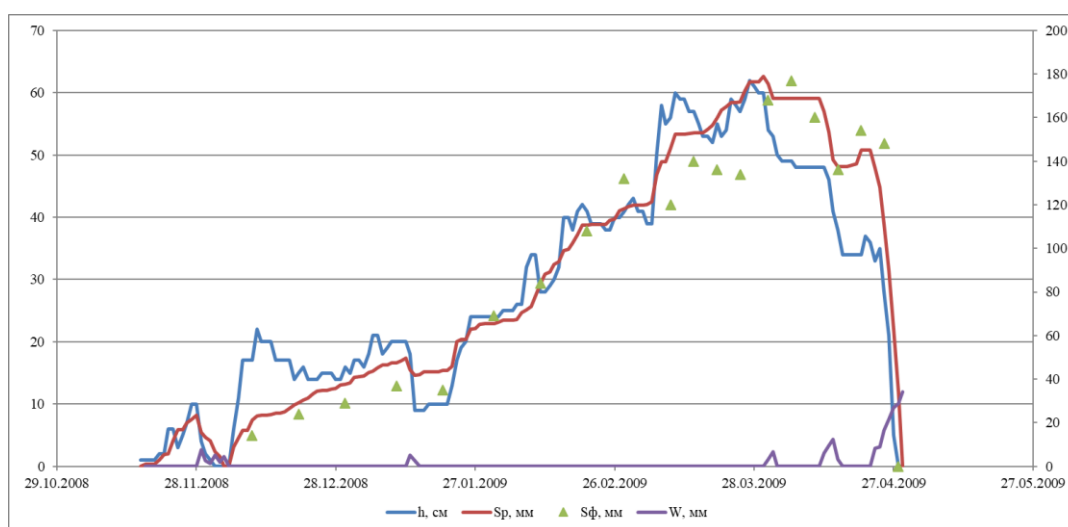


Рисунок 3.1.1.1 – Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге, водоотдачи из снежного покрова, а также высоты снежного покрова станции р. Онега – г. Каргополь для холодного периода 2008 - 2009 гг.

Глядя на этот график можно сделать вывод о том, что расчетные значения – модельные данные хорошо согласуются с фактическими.

Ниже приведен фрагмент таблицы и рассчитанные значения водоотдачи.

Таблица 3.1.1.1 – Отрывок из собранной базы данных станции р. Онега – г. Каргополь для холодного периода 2008 - 2009 гг.

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	h, см	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
13.11.2008	5	0		1			
14.11.2008	3,3	0		1			
15.11.2008	3	0,8		7			
16.11.2008	1,4	12,7		8		0	
17.11.2008	-0,3	1,1	0	9		1,1	0
18.11.2008	-3	0		11		1,1	0
19.11.2008	-2,8	0		11		1,1	0
20.11.2008	-3,4	1,7		12		2,8	0
21.11.2008	-4,1	2,5		12		5,4	0
22.11.2008	-4,4	0,5		11		5,9	0
23.11.2008	-3,5	5,8		10		11,8	0
24.11.2008	-0,1	4,8		12		16,7	0
25.11.2008	-2	0		12		16,7	0
26.11.2008	-3,7	3,2		13		19,9	0
27.11.2008	-4,8	1,4		19		21,4	0
28.11.2008	-2,1	2		31		23,4	0
29.11.2008	2,5	0		30		15,7	7,7
30.11.2008	1,2	1,1		34		13,2	2,5
01.12.2008	0,9	1,4		34		11,8	1,4
02.12.2008	1,9	0,6		31		6,6	5,2
03.12.2008	1,5	2,5		29		4,6	2
04.12.2008	2,9	1,4		29		0	4,6
05.12.2008	1,3	0,9		29		0	0
06.12.2008	-0,3	8,6		24		8,8	0
07.12.2008	-1,8	4,3		23		13,1	0
08.12.2008	-2,4	3,3		23		16,5	0
09.12.2008	-4,6	0		23		16,5	0
10.12.2008	-4	4,7		24	14	21,3	0
11.12.2008	-4,1	1,9		22		23,2	0

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	h, см	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
12.12.2008	-5	0,3		21		23,5	0
13.12.2008	-5	0		27		23,5	0
14.12.2008	-4,7	0,4		26		23,9	0
15.12.2008	-2,5	0,5		26		24,4	0
16.12.2008	-3,4	0		26		24,4	0
17.12.2008	-6	0,6		26		25	0
18.12.2008	-6,2	1,4		26		26,5	0
19.12.2008	-4,7	1,6		23		28,1	0
20.12.2008	-4,4	1		26	24	29,1	0
21.12.2008	-4,8	1,2		26		30,3	0
22.12.2008	-7,7	1,2		26		31,5	0
23.12.2008	-6,6	1,7		27		33,3	0
24.12.2008	-6,5	1,1		27		34,4	0
25.12.2008	-9,3	0,3		27		34,7	0
26.12.2008	-6	0,2		27		34,9	0
27.12.2008	-2,2	0,6		26		35,5	0
28.12.2008	-6,6	0,2		26		35,7	0
29.12.2008	-3,3	1,6		26		37,3	0
30.12.2008	-0,9	0,3		26	29	37,7	0
31.12.2008	-0,7	0,5		25		38,2	0
01.01.2009	-3,9	2,6		25		40,8	0
02.01.2009	-13,7	0,3		25		41,1	0
03.01.2009	-17,5	0,3		25		41,4	0
04.01.2009	-17,5	1,7		25		43,1	0
05.01.2009	-19,3	0,6		25		43,8	0
06.01.2009	-10,5	1,4		25		45,2	0
07.01.2009	-7,9	1,2		25		46,4	0
08.01.2009	-21	0,2		25		46,6	0
09.01.2009	-22,6	0,9		25		47,5	0

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	h, см	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
10.01.2009	-28,2	0		25	37	47,5	0
11.01.2009	-11,4	1		28		48,5	0
12.01.2009	0,2	1,6		32		49,6	0
13.01.2009	2	1		31		44,4	5,2
14.01.2009	1,4	1,7		30		41,9	2,5
15.01.2009	0,5	1,8		30		42,2	0
16.01.2009	-4,8	1		29		43,2	0
17.01.2009	-12,4	0,3		29		43,5	0
18.01.2009	-15	0		29		43,5	0
19.01.2009	-14,1	0		31		43,5	0
20.01.2009	-9	0,6		30	35	44,1	0
21.01.2009	-7,7	0		29		44,1	0
22.01.2009	-6,1	1,6		29		45,8	0
23.01.2009	-1,8	11,2		31		57,2	0
24.01.2009	-3	0,9		34		58,1	0
25.01.2009	-5,7	0		33		58,1	0
26.01.2009	-2,4	4,7		36		62,9	0
27.01.2009	-1,4	0,3		36		63,2	0
28.01.2009	-2,9	2		35		65,2	0
29.01.2009	-6,3	0,2		35		65,4	0
30.01.2009	-19,4	0		34		65,4	0
31.01.2009	-24,8	0		34	69	65,4	0
01.02.2009	-21,1	0,8		36		66,2	0
02.02.2009	-8,9	0,9		36		67,1	0
03.02.2009	-7,2	0		38		67,1	0
04.02.2009	-5,6	0		41		67,1	0
05.02.2009	-14,9	0,3		41		67,4	0
06.02.2009	-22,8	3		46		70,5	0
07.02.2009	-16,1	1,2		47		71,7	0

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	h, см	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
08.02.2009	-10,3	1,8		48		73,5	0
09.02.2009	-1,5	4,6		48		78,2	0
10.02.2009	0,6	7,1		48	84	83,6	0
11.02.2009	-0,4	4,4		47		88,1	0
12.02.2009	-2,5	1		46		89,1	0
13.02.2009	-3,6	3,3		43		92,5	0
14.02.2009	-1,8	1,5		47		94	0
15.02.2009	-2	4,9		47		99	0
16.02.2009	-1,3	0,5		45		99,5	0
17.02.2009	-2,1	2,9		44		102	0
18.02.2009	-3,8	3,8		51		106,3	0
19.02.2009	-1,3	4,2		51		110,6	0
20.02.2009	-1,4	0,2		50	108	110,8	0
21.02.2009	-4,4	0,2		50		111	0
22.02.2009	-12,2	0		50		111	0
23.02.2009	-14,6	0		51		111	0
24.02.2009	-13	0		50		111	0
25.02.2009	-7	2		49		113	0
26.02.2009	-6,6	0,6		53		113,6	0
27.02.2009	-3,3	3,5		53		117,2	0
28.02.2009	-1,3	1		57	132	118,2	0
01.03.2009	-2	1,1		53		119,3	0
02.03.2009	-1,8	0,5		54		119,8	0
03.03.2009	-2,6	0		54		119,8	0
04.03.2009	-3,9	0		52		119,8	0
05.03.2009	-3,8	0,2		55		120	0
06.03.2009	-3,6	1,3		56		121,4	0
07.03.2009	-3,9	12		56		133,6	0
08.03.2009	-2,9	5,9		57		139,6	0

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	h, см	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
09.03.2009	-3,4	0		57		139,6	0
10.03.2009	-3,6	6,2		57	120	145,9	0
11.03.2009	-3,8	6,5		57		152,5	0
12.03.2009	-10,7	0		57		152,5	0
13.03.2009	-12,5	0		53		152,5	0
14.03.2009	-5,7	0,2		54		152,7	0
15.03.2009	-3,1	0,2		55	140	152,9	0
16.03.2009	-4,5	0		56		152,9	0

3.1.2 Модель формирования стока реки

Модель формирования стока фактически отражает реакцию стока на внешнее воздействие. Ко внешним воздействиям можно отнести значения осредненных температур и поступающих на водосбор осадков за 2008 – 2022 гг. по метеостанциям Каргополь и Няндомы. В качестве расчетного объекта была выбрана р. Ковжа – д. Шулепово, где за 2010 г. и 2015 г. полностью или частично пропущены данные о расходах

За начало выделенного периода половодья принималась дата за день до устойчивого перехода через 0 °C. Затем выполнялась параметризация модели за все года, машинным образом находились параметры k и τ . Позже по расчетной формуле вычислялись значения расходов $Q_{\text{расч}}$.

Ниже можно увидеть пример графиков за 2008 г.

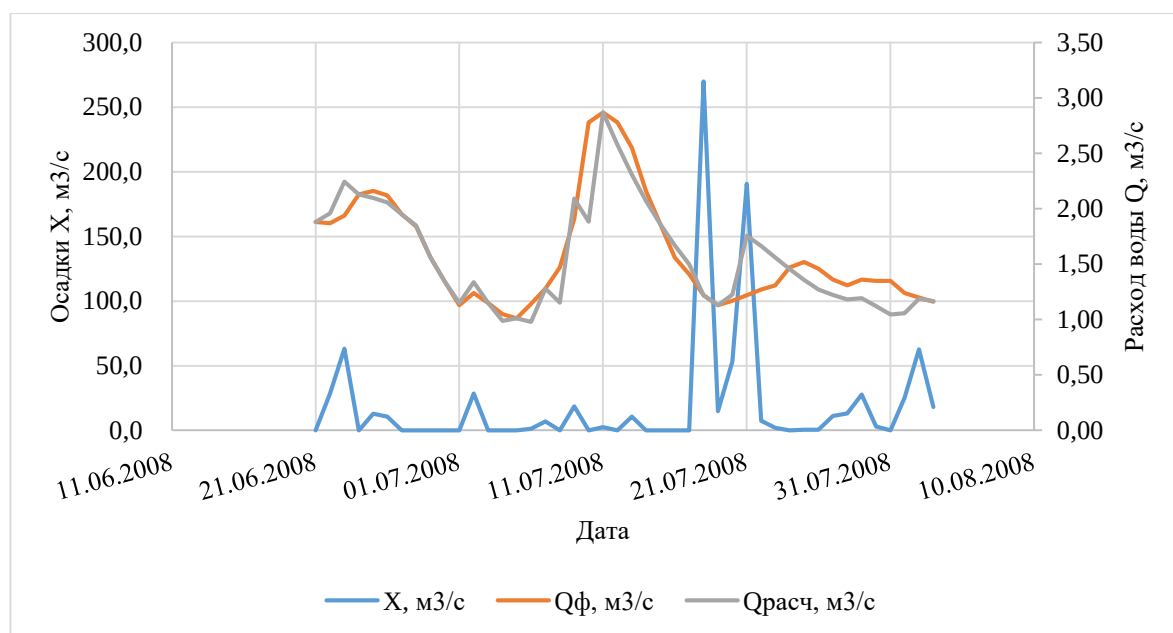


Рисунок 3.1.2.1 – График параметризации расходов воды на
р. Ковжа – д. Шулепово за 2008 г. с помощью модели первого порядка

бжз - д.Шуле		F =	712	км²	0,011574074										Температура		Водоподача		Переход через 0		
дата	день/год	X, мм	X, м³/с	Qф, м³/с	Qрасч, м³/с	δ	S	σ					кр, °C	Каргополь	Няндом	Каргополь	Няндом	Каргополь	Няндом		
21.06.2008	173	0,0	0,0	1,88	1,88	0,00	5,0	6,0	Hcp = 2,0 S/σ = 1,1	k = 0,12	17,8	17,6	18,0	0,0	0,0	k = 0,09 τ = 7,09 Σ δ = 0,18	17,7	17,2	18,1	6,9	0,0
22.06.2008	174	3,5	28,4	1,87	1,96	0,09	0,01	0,0		τ = 19,36	17,9	17,2	18,1	6,9	0,0		17,7	17,2	18,1	6,9	0,0
23.06.2008	175	7,7	63,0	1,94	2,25	0,31	0,09	0,0		Σ δ = 0,53	14,9	14,9	14,9	7,6	7,7		14,9	14,9	14,9	7,6	7,7
24.06.2008	176	0,0	0,0	2,13	2,13	0,00	0,00	0,0			17,0	17,7	16,3	0,0	0,0		17,0	17,7	16,3	0,0	0,0
25.06.2008	177	1,6	12,8	2,16	2,10	0,06	0,00	0,0			17,3	16,9	17,6	2,7	0,4		17,3	16,9	17,6	2,7	0,4
26.06.2008	178	1,3	10,7	2,12	2,06	0,06	0,00	0,0	Hcp = 1,2 S/σ = 0,5	13,0	13,0	13,0	0,9	1,7	13,0	13,0	13,0	0,9	1,7		
27.06.2008	179	0,0	0,0	1,95	1,95	0,00	0,00	0,0		13,3	14,0	12,5	0,0	0,0	13,3	14,0	12,5	0,0	0,0		
28.06.2008	180	0,0	0,0	1,84	1,85	0,01	0,00	0,0		14,5	14,8	14,2	0,0	0,0	14,5	14,8	14,2	0,0	0,0		
29.06.2008	181	0,0	0,0	1,56	1,56	0,00	3,0	4,0		16,9	17,6	16,1	0,0	0,0	16,9	17,6	16,1	0,0	0,0		
30.06.2008	182	0,0	0,0	1,34	1,34	0,00	0,00	0,0		18,2	18,3	18,0	0,0	0,0	18,2	18,3	18,0	0,0	0,0		
01.07.2008	183	0,0	0,0	1,13	1,15	0,02	0,00	0,0	Hcp = 1,2 S/σ = 0,5	18,6	18,5	18,7	0,0	0,0	18,6	18,5	18,7	0,0	0,0		
02.07.2008	184	3,5	28,4	1,24	1,34	0,10	0,01	0,0		20,9	20,8	20,9	4,4	2,5	20,9	20,8	20,9	4,4	2,5		
03.07.2008	185	0,0	0,0	1,15	1,15	0,00	0,00	0,0		21,9	21,5	22,3	0,0	0,0	21,9	21,5	22,3	0,0	0,0		
04.07.2008	186	0,0	0,0	1,05	0,99	0,06	0,00	0,0		19,6	19,6	19,5	0,0	0,0	19,6	19,6	19,5	0,0	0,0		
05.07.2008	187	0,0	0,0	1,01	1,01	0,00	3,0	4,0		12,4	12,8	12,0	0,0	0,0	12,4	12,8	12,0	0,0	0,0		
06.07.2008	188	0,2	1,2	1,14	0,98	0,16	0,03	0,2	Hcp = 1,6 S/σ = 0,8	11,1	11,3	10,9	0,0	0,3	11,1	11,3	10,9	0,0	0,3		
07.07.2008	189	0,9	7,0	1,28	1,28	0,00	0,00	0,1		Σ δ = 1,56	13,3	13,4	13,2	0,0	1,7	13,3	13,4	13,2	0,0	1,7	
08.07.2008	190	0,0	0,0	1,47	1,15	0,32	0,10	0,0		13,3	13,5	13,0	0,0	0,0	13,3	13,5	13,0	0,0	0,0		
09.07.2008	191	2,3	18,5	1,91	2,09	0,18	0,03	0,1		14,6	14,9	14,3	2,2	2,3	14,6	14,9	14,3	2,2	2,3		
10.07.2008	192	0,0	0,0	2,78	1,88	0,90	0,81	1,4		15,5	15,9	15,0	0,0	0,0	15,5	15,9	15,0	0,0	0,0		
11.07.2008	193	0,3	2,5	2,87	2,87	0,00	5,0	6,0	Hcp = 2,1 S/σ = 0,3	k = 0,00	17,1	17,0	17,2	0,5	0,1	k = 0,00	17,1	17,0	17,2	0,5	0,1
12.07.2008	194	0,0	0,0	2,78	2,58	0,20	0,04	0,5		τ = 9,77	18,4	18,2	18,5	0,0	0,0	τ = 9,77	18,4	18,2	18,5	0,0	0,0
13.07.2008	195	1,3	10,7	2,55	2,31	0,24	0,06	0,2		Σ δ = 0,73	18,7	18,9	18,4	2,6	0,0	18,7	18,9	18,4	2,6	0,0	
14.07.2008	196	0,0	0,0	2,16	2,07	0,09	0,01	0,0		19,2	19,3	19,1	0,0	0,0	19,2	19,3	19,1	0,0	0,0		
15.07.2008	197	0,0	0,0	1,86	1,86	0,00	0,00	0,0		21,5	21,7	21,3	0,0	0,0	21,5	21,7	21,3	0,0	0,0		
16.07.2008	198	0,0	0,0	1,56	1,67	0,11	0,01	0,2	18,6	18,7	18,5	0,0	0,0	18,6	18,7	18,5	0,0	0,0			
17.07.2008	199	0,0	0,0	1,41	1,50	0,09	0,01	0,4	19,5	19,6	19,3	0,0	0,0	19,5	19,6	19,3	0,0	0,0			
18.07.2008	200	32,8	269,9	1,22	1,22	0,00	0,00	0,7	-	19,4	19,1	19,6	34,8	30,7	19,4	19,1	19,6	34,8	30,7		

Рисунок 3.1.2.2 – Расчет параметров модели формирования стока первого
порядка

На графике 3.1.2.1 и рисунке 3.1.2.2 видно, что модель плохо реагирует на заданные условия из-за высокой водности региона, поэтому было принято решение перейти к более сложной модели второго порядка, где учитывается влияние не только поверхностного стока, которая выглядит следующим образом:

$$\tau_2 \frac{Q_{n+1} - 2Q_n + Q_{n-1}}{\Delta t^2} + \left(\frac{\tau_2}{k\tau_1} + 1 \right) \left(\frac{Q_{n+1} - Q_n}{\Delta t} \right) + \frac{1}{k\tau_1} Q_n = \frac{\dot{X}_n}{\tau_1}. \quad (4.2.1)$$

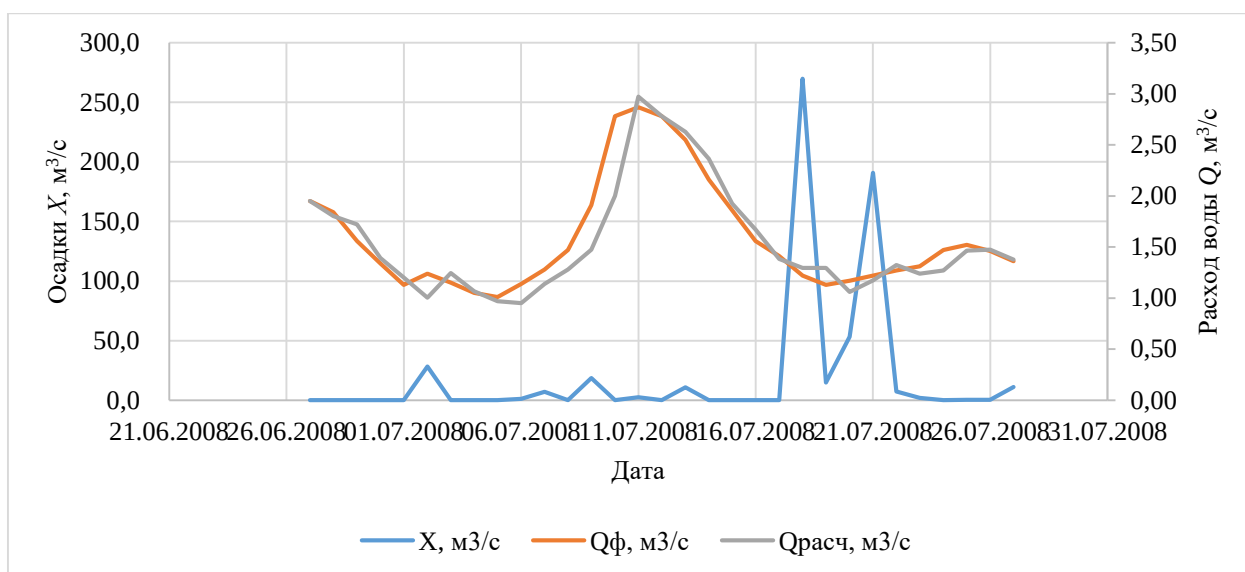


Рисунок 3.1.2.3 – График параметризации расходов воды на р. Ковжа – д. Шулепово за 2008 г. моделью второго порядка,

$$k = 0.02, \tau_1 = 35 \text{ сут.}, \tau_2 = 14 \text{ сут.}, S/\sigma = 0.28.$$

р.Ковжа - д.Шулепово		F =	712	км²	0,011574												Температура		Водоподача		Переход через 0		
дата	день/год	X, мм	X, м³/с	Qф, м³/с	Qрасч, м³/с	δ	S	σ									тср, °C	Каргополь	Няндом	Каргополь	Няндом	Каргополь	Няндом
27.06.2008	179	0,0	0,0	1,95	1,95	0,00			Hcp = 1,6 S/σ = 0,3 k = 0,02 τ1 = 35,00 τ2 = 14,19 Σ δ = 3,84 n = 30	13,3	14,0	12,5	0,0	0,0									
28.06.2008	180	0,0	0,0	1,84	1,80	0,04	0,00	0,06		14,5	14,8	14,2	0,0	0,0									
29.06.2008	181	0,0	0,0	1,56	1,72	0,16	0,03	0,00		16,9	17,6	16,1	0,0	0,0									
30.06.2008	182	0,0	0,0	1,34	1,39	0,05	0,00	0,06		18,2	18,3	18,0	0,0	0,0									
01.07.2008	183	0,0	0,0	1,13	1,20	0,07	0,01	0,21		18,6	18,5	18,7	0,0	0,0									
02.07.2008	184	3,5	28,4	1,24	1,01	0,23	0,06	0,12		20,9	20,8	20,9	4,4	2,5									
03.07.2008	185	0,0	0,0	1,15	1,25	0,10	0,01	0,19		21,9	21,5	22,3	0,0	0,0									
04.07.2008	186	0,0	0,0	1,05	1,07	0,02	0,00	0,29		19,6	19,6	19,5	0,0	0,0									
05.07.2008	187	0,0	0,0	1,01	0,97	0,04	0,00	0,33		12,4	12,8	12,0	0,0	0,0									
06.07.2008	188	0,2	1,2	1,14	0,95	0,19	0,04	0,20		11,1	11,3	10,9	0,0	0,3									
07.07.2008	189	0,9	7,0	1,28	1,14	0,14	0,02	0,09	13,3	13,4	13,2	0,0	1,7										
08.07.2008	190	0,0	0,0	1,47	1,28	0,19	0,04	0,01	13,3	13,5	13,0	0,0	0,0										
09.07.2008	191	2,3	18,5	1,91	1,47	0,44	0,19	0,10	14,6	14,9	14,3	2,2	2,3										
10.07.2008	192	0,0	0,0	2,78	2,00	0,78	0,61	1,43	15,5	15,9	15,0	0,0	0,0										
11.07.2008	193	0,3	2,5	2,87	2,97	0,10	0,01	1,65	17,1	17,0	17,2	0,5	0,1										
12.07.2008	194	0,0	0,0	2,78	2,78	0,00	0,00	1,43	18,4	18,2	18,5	0,0	0,0										
13.07.2008	195	1,3	10,7	2,55	2,63	0,08	0,01	0,93	18,7	18,9	18,4	2,6	0,0										
14.07.2008	196	0,0	0,0	2,16	2,36	0,20	0,04	0,33	19,2	19,3	19,1	0,0	0,0										
15.07.2008	197	0,0	0,0	1,86	1,93	0,07	0,00	0,08	21,5	21,7	21,3	0,0	0,0										
16.07.2008	198	0,0	0,0	1,56	1,67	0,11	0,01	0,00	18,6	18,7	18,5	0,0	0,0										
17.07.2008	199	0,0	0,0	1,41	1,38	0,03	0,00	0,03	19,5	19,6	19,3	0,0	0,0										
18.07.2008	200	32,8	269,9	1,22	1,29	0,07	0,01	0,13	19,4	19,1	19,6	34,8	30,7										
19.07.2008	201	1,8	14,8	1,13	1,29	0,16	0,03	0,21	17,7	17,2	18,2	1,4	2,2										
20.07.2008	202	6,5	53,2	1,17	1,06	0,11	0,01	0,17	21,2	20,8	21,6	11,4	1,5										
21.07.2008	203	23,2	190,8	1,22	1,17	0,05	0,00	0,13	19,5	19,3	19,7	27,9	18,4										
22.07.2008	204	0,9	7,4	1,27	1,32	0,05	0,00	0,10	18,4	18,5	18,3	1,4	0,4										
23.07.2008	205	0,3	2,1	1,31	1,24	0,07	0,01	0,08	18,1	18,1	18,0	0,5	0,0										
24.07.2008	206	0,0	0,0	1,47	1,27	0,20	0,04	0,01	17,0	17,4	16,6	0,0	0,0										
25.07.2008	207	0,1	0,4	1,52	1,46	0,06	0,00	0,00	16,7	17,5	15,8	0,0	0,1										
26.07.2008	208	0,1	0,4	1,46	1,47	0,01	0,00	0,02	13,9	14,5	13,3	0,0	0,1										
27.07.2008	209	1,4	11,1	1,36	1,38	0,02	0,00	0,05	12,9	13,1	12,6	2,7	0,0										

Рисунок 3.1.2.4 – Расчет параметров модели формирования стока второго порядка

Очевидно, что модель второго порядка полнее отражает реакцию формирующегося стока на внешние воздействия. Более того, если для модели первого порядка для данной местности было ограничение 10-15 суток до нового прогнозного периода из-за высокой водности региона, то параметры модели второго порядка способны увеличить исследуемый период практически без потери качества.

Таблица 3.1.2.1 – Численные значения параметра k за весь период полученные при параметризации формирования стока и средние значения коэффициента за 2008 – 2019 гг.

Год/Период	1	2	3	4	5	6	7	8
2008	1,098 1	0,195 5	0,071 0	0,016 8	0,025 1	0,071 2	0,163 2	0,019 3
2009	0,306 1	0,298 1	0,465 1	0,079 1	0,045 8	0,123 0	0,000 0	0,000 0
2010	0,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0
2011	0,103 1	0,216 8	0,019 5	0,009 4	0,086 6	0,052 9	0,069 3	0,000 0
2012	0,349 6	0,128 3	0,044 7	0,138 8	0,089 7	0,083 0	0,000 0	0,000 0
2013	0,374 4	0,592 9	0,017 4	0,042 9	0,000 4	0,022 3	0,201 5	0,000 0
2014	0,301 5	0,020 6	0,013 3	0,021 5	0,003 7	0,000 0	0,000 0	0,000 0

2015	0,000 0	0,215 7	0,050 6	0,060 8	0,011 1	0,088 7	0,030 9	0,000 0
2016	0,195 5	0,684 9	0,048 9	0,084 7	0,193 6	0,111 4	0,426 8	0,000 0
2017	0,480 9	0,132 5	0,511 9	0,085 3	0,151 8	0,517 3	0,000 0	0,000 0
2018	0,104 5	0,078 3	0,045 1	0,086 2	0,000 6	0,173 6	0,167 2	0,000 0
2019	0,009 9	0,516 9	0,074 8	0,007 3	0,217 1	0,309 9	0,356 9	0,000 0
Среднее	0,277	0,257	0,114	0,053	0,069	0,129	0,118	0,002

Таблица 3.1.2.2 – Оценка расчета расходов воды р. Ковжа – д. Шулепово по критерию S/σ

Год/Период	1	2	3	4	5	6	7	8
Оценка расчета расходов воды р. Ковжа по критерию S/σ при параметризации								
2008	0,80	0,15	0,21	0,28	0,10	0,09	0,20	0,25
2009	0,80	0,47	0,14	0,10	0,12	0,23	0,00	0,00
2010	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	0,83	0,11	0,09	0,17	0,10	0,20	0,22	0,00
2012	1,10	0,32	0,12	0,12	0,09	0,28	0,00	0,00
2013	0,77	0,16	0,11	0,17	0,09	0,08	0,16	0,00
2014	0,63	0,14	0,09	0,07	0,05	0,12	0,00	0,00

Год/Период	1	2	3	4	5	6	7	8
2015	0,00	0,66	0,21	0,17	0,08	0,45	0,20	0,00
2016	2,42	0,20	0,10	0,19	0,12	0,21	0,34	0,00
2017	0,66	0,50	0,46	0,44	0,19	0,30	0,00	0,00
2018	1,30	0,13	0,23	0,16	0,07	0,31	0,22	0,00
2019	0,66	0,54	0,17	0,08	0,10	0,20	0,30	0,00
Среднее	0,83	0,28	0,16	0,16	0,09	0,21	0,14	0,02
Оценка расчета расходов воды р. Ковжа по критерию S/σ на независимом материале								
2020	0,69	1,15	0,38	0,33	0,31	0,67	0,73	4,80
2021	0,56	0,87	0,06	0,09	0,22	0,13	0,24	7,21
2022	0,73	0,72	0,17	0,33	0,11	0,17	0,32	

Значение S/σ не должно превышать 0,80 в случае длинны ряда, превышающего $n = 25$. Из таблицы 3.1.2.2 видно, что апробация модели является успешной на 83%. Успешность параметризации модели составляет 94%.

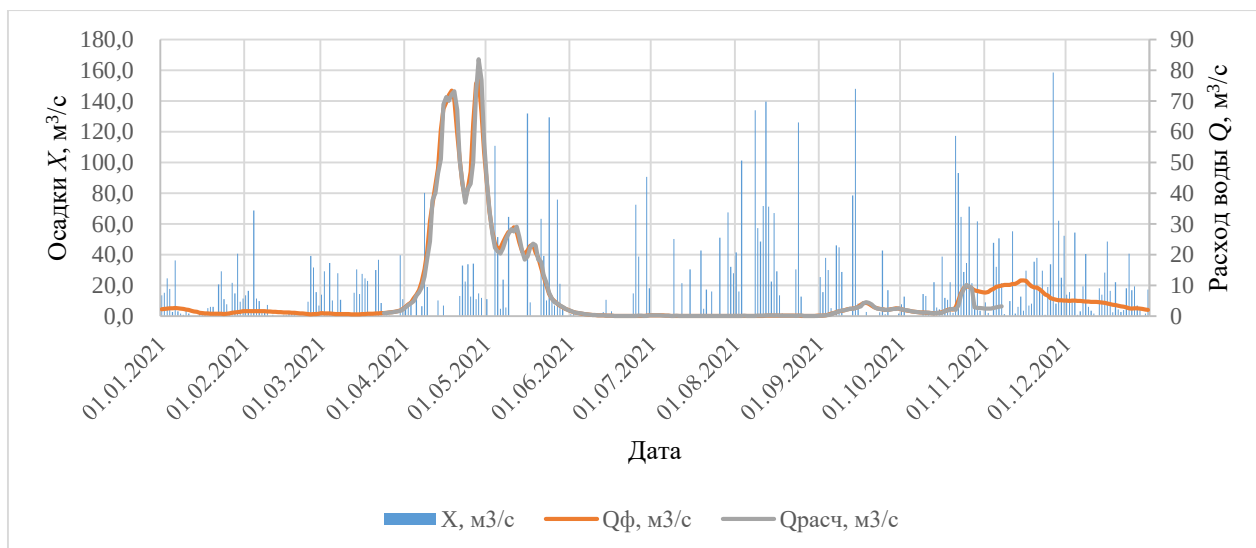


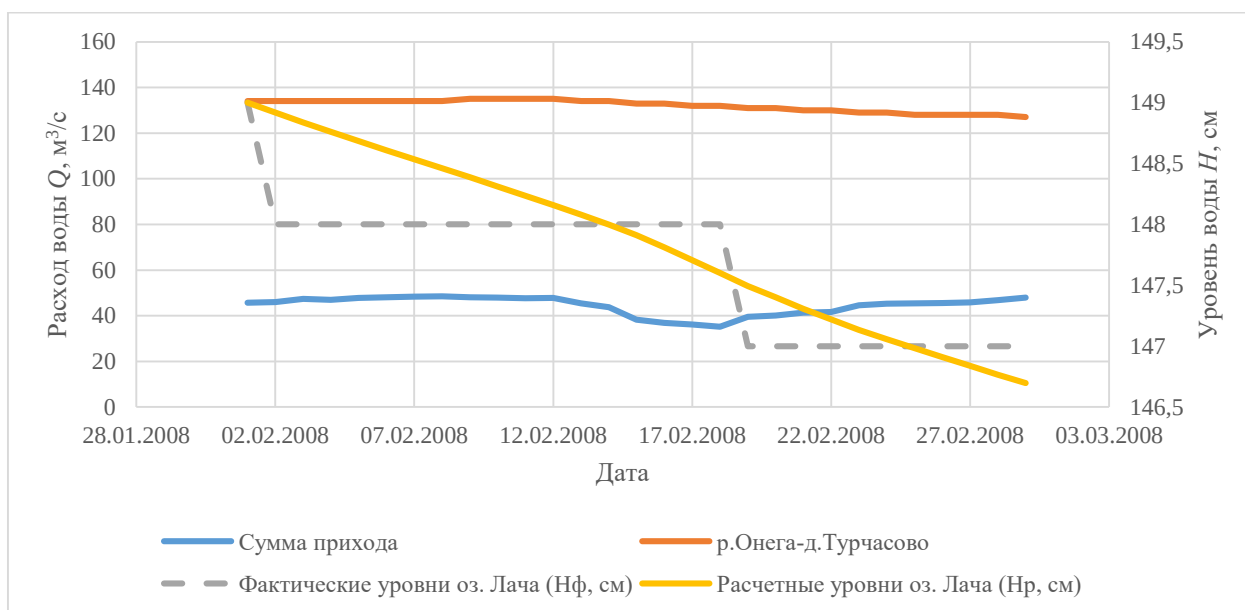
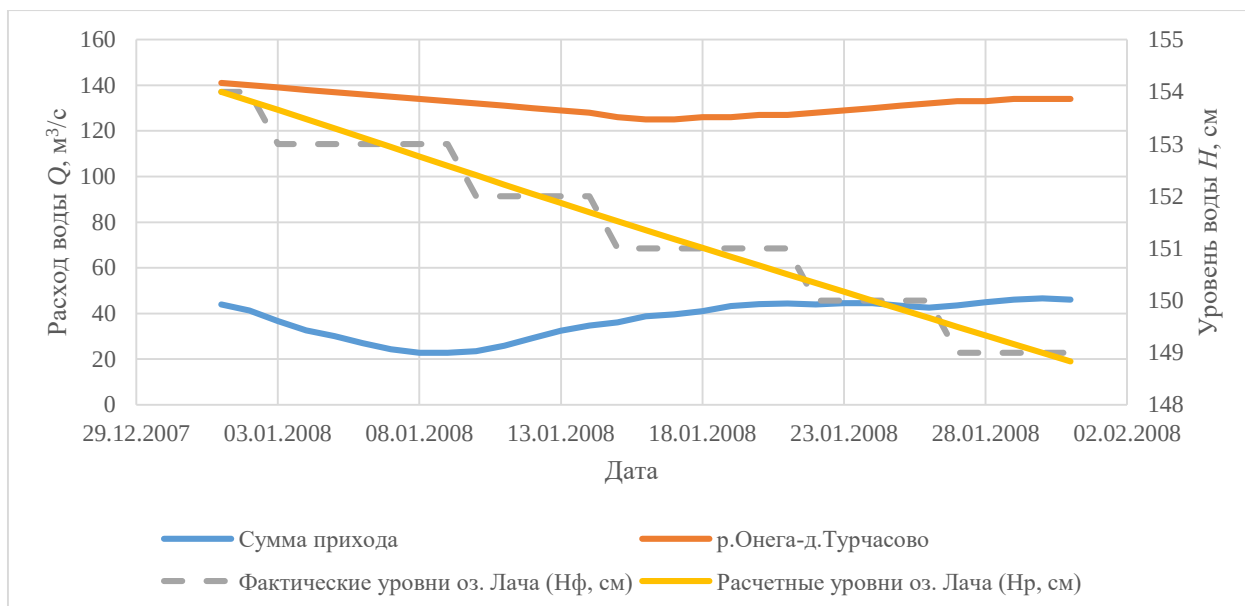
Рисунок 3.1.2.5 – График прогнозных значений расходов воды на р. Ковжа – д. Шулепово за 2021 г.

3.1.3 Модель озера Лача

Как внешнее воздействие, для модели водоема задействованы данные о значениях уровней воды оз. Лаче – с. Нокола за 2008 – 2022 гг. и значения расходов втекающих рек за тот же временной отрезок. За 2020 г. выявлена ошибка в ежедневных уровнях воды – превышение уровней.

Требовалось параметризовать модель, то есть решить обратную задачу, для 2008 – 2019 гг. и для трех последних лет выполнить апробацию по усредненному значению $k_{\text{морф}}$. Решению этой задачи способствовала надстройка *MSExcel* “Поиск решения”.

Ниже, как пример, приведены графики параметризации уровней воды на оз. Лаче – с. Нокола за 2008 – 2022 гг., где можно увидеть результаты удачной и неудачной параметризации соответственно.



№	Дата	р. Ковжа - д. Шупеново	р. Лехица - д. Кузьмино	р. Свишь - д. Давыдов	р. Ухта - д. Ерёмино	1,52		1,46		1,02		1,01		1,28		Фактические уровни от Лача (Нф, см)	Расчет			Расчетные уровни от Лача (Нр, см)	S ²	σ
						р. Ковжа	р. Лехица	р. Свишь	р. Ухта	Сумма прилива	р. Онега - д. Турчасово											
4	04.01.2008	0,79	3,57	17,3	1,42	1,2	5,2	17,7	1,4	32,6	138	153	Экстремальный коэффициент	Исток = 0,01	0,01	153	0	3				
5	05.01.2008	0,76	3,46	15,7	1,3	1,2	5,1	16,1	1,3	30,1	137	153		ΣS ² = 8,64	8,64	153	0	3				
6	06.01.2008	0,69	3,42	13,6	1,18	1,0	5,0	13,9	1,2	27,0	136	153		Нор = 151	151	153	0	3				
7	07.01.2008	0,66	3,27	11,9	1,09	1,0	4,8	12,2	1,1	24,3	135	153		n = 30	30	153	0	3				
8	08.01.2008	0,63	3,21	10,9	1,03	1,0	4,7	11,2	1,0	22,8	134	153		S/o = 0,35	0,35	153	0	3				
9	09.01.2008	0,63	3,33	10,7	1,09	1,0	4,9	11,0	1,1	22,8	133	153				152	0	1				
10	10.01.2008	0,6	3,43	11,1	1,09	0,9	5,0	11,4	1,1	23,5	132	152				152	0	1				
11	11.01.2008	0,6	3,44	12,8	1,22	0,9	5,0	13,1	1,2	25,9	131	152				152	0	1				
12	12.01.2008	0,57	3,43	15,4	1,22	0,9	5,0	15,8	1,2	29,2	130	152				152	0	1				
13	13.01.2008	0,6	3,61	17,6	1,25	0,9	5,3	18,0	1,3	32,5	129	152				152	0	1				
14	14.01.2008	0,63	3,80	19	1,25	1,0	5,5	19,5	1,3	34,7	128	152	Экстремальный коэффициент			152	0	1				
15	15.01.2008	0,63	3,90	19,8	1,36	1,0	5,7	20,3	1,4	36,1	126	151				152	1	0				
16	16.01.2008	0,66	3,98	21,6	1,41	1,0	5,8	22,1	1,4	38,7	125	151				151	0	0				
17	17.01.2008	0,69	4,00	22,2	1,4	1,0	5,8	22,7	1,4	39,6	125	151				151	0	0				
18	18.01.2008	0,69	4,00	25,2	1,51	1,0	5,8	23,8	1,5	41,0	126	151				151	0	0				
19	19.01.2008	0,72	4,14	24,5	1,63	1,1	6,0	25,1	1,7	43,2	126	151				151	0	0				
20	20.01.2008	0,72	4,10	25,2	1,67	1,1	6,0	25,8	1,7	44,1	127	151				151	0	0				
21	21.01.2008	0,72	4,00	25,5	1,72	1,1	5,8	26,1	1,7	44,4	127	151				151	0	0				
22	22.01.2008	0,72	3,81	25,4	1,76	1,1	5,6	26,0	1,8	43,9	128	150				150	0	2				
23	23.01.2008	0,75	3,80	25,8	1,76	1,1	5,5	26,4	1,8	44,5	129	150	Экстремальный коэффициент			150	0	2				
24	24.01.2008	0,79	3,70	25,8	1,85	1,2	5,4	26,4	1,9	44,5	130	150				150	0	2				
25	25.01.2008	0,81	3,60	25	1,94	1,2	5,3	25,6	2,0	43,4	131	150				150	0	2				
26	26.01.2008	0,81	3,50	24,4	2	1,2	5,1	25,0	2,0	42,5	132	150				150	0	2				
27	27.01.2008	0,85	3,47	23,1	2,02	1,3	5,1	25,7	2,0	43,5	133	149				149	0	5				
28	28.01.2008	0,92	3,47	26,1	2,02	1,4	5,1	26,7	2,0	44,9	133	149				149	0	5				
29	29.01.2008	0,86	3,37	27,2	2,02	1,3	4,9	27,9	2,0	46,1	134	149				149	0	5				
30	30.01.2008	0,89	3,30	27,8	1,93	1,4	4,8	28,5	2,0	46,7	134	149				149	0	5				
31	31.01.2008	0,89	3,26	27,5	1,84	1,4	4,8	28,2	1,9	46,1	134	149				149	0	5				
32	01.02.2008	0,89	3,36	27,1	1,84	1,4	4,9	27,7	1,9	45,8	134	149	Экстремальный коэффициент	II F = 334 км ²	334 км ²	149	1	0				
33	02.02.2008	0,89	3,26	27,3	1,92	1,4	4,8	28,0	1,9	45,9	134	148		Исток = 0,0000	0,0000	149	1	0				
34	03.02.2008	0,89	3,32	28,3	1,92	1,4	4,8	29,0	1,9	47,4	134	148		Исток = 0,11	0,11	149	1	0				
35	04.02.2008	0,92	3,41	27,8	1,94	1,4	5,0	28,5	2,0	47,0	134	148		Исток = 0,06	0,06	149	1	0				
36	05.02.2008	0,95	3,41	28,4	1,92	1,4	5,0	29,1	1,9	47,8	134	148		ΣS ² = 8,64	8,64	149	1	0				
37	06.02.2008	1,01	3,36	28,5	2,02	1,5	4,9	29,2	2,0	48,1	134	148		Нор = 148	148	149	1	0				
38	07.02.2008	1,01	3,42	28,7	2,02	1,5	5,0	29,4	2,0	48,4	134	148		n = 28	28	148	0	0				
39	08.02.2008	1,11	3,42	28,5	2,11	1,7	5,0	29,2	2,1	48,3	134	148		S/o = 1,21	1,21	148	0	0				
40	09.02.2008	1,25	3,42	28	2,11	1,9	5,0	28,7	2,1	48,1	135	148				148	0	0				
41	10.02.2008	1,3	3,47	27,7	2,11	2,0	5,1	28,4	2,1	47,9	135	148				148	0	0				

Рисунок 3.1.3.3 – Расчет параметров модели водоема первого порядка

Таблица 3.1.3.1 – Численные значения параметра $k_{\text{морф}}$ за весь период полученные при параметризации модели водоема и средние значения коэффициента за 2008 – 2019 гг.

Год/Период	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2008	0,001	0,000	0,001	0,001	0,028	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,012	0,002
2009	0,004	0,000	0,001	0,002	0,046	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,018	0,012
2010	0,003	0,000	0,000	0,031	0,035	0,000	0,007	0,001	0,003	0,000	0,000	0,001
2011	0,002	0,000	0,001	0,001	0,033	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001
2012	0,004	0,000	0,001	0,001	0,034	0,000	0,000	0,000	0,026	0,000	0,000	0,006
2013	0,003	0,001	0,001	0,008	0,037	0,002	0,011	0,001	0,004	0,000	0,000	0,003
2014	0,000	0,000	0,001	0,029	0,038	0,000	0,000	0,001	0,014	0,000	0,002	0,000
2015	0,001	0,000	0,001	0,014	0,038	0,001	0,015	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
2016	0,004	0,000	0,003	0,012	0,018	0,000	0,000	0,001	0,042	0,000	0,000	0,004
2017	0,000	0,000	0,001	0,004	0,028	0,000	0,000	0,001	0,044	0,000	0,002	0,000
2018	0,000	0,000	0,000	0,010	0,040	0,001	0,001	0,001	0,007	0,000	0,012	0,002
2019	0,000	0,000	0,001	0,015	0,037	0,008	0,000	0,001	0,012	0,000	0,012	0,001
Среднее	0,002	0,000	0,001	0,011	0,034	0,001	0,003	0,001	0,013	0,000	0,005	0,003

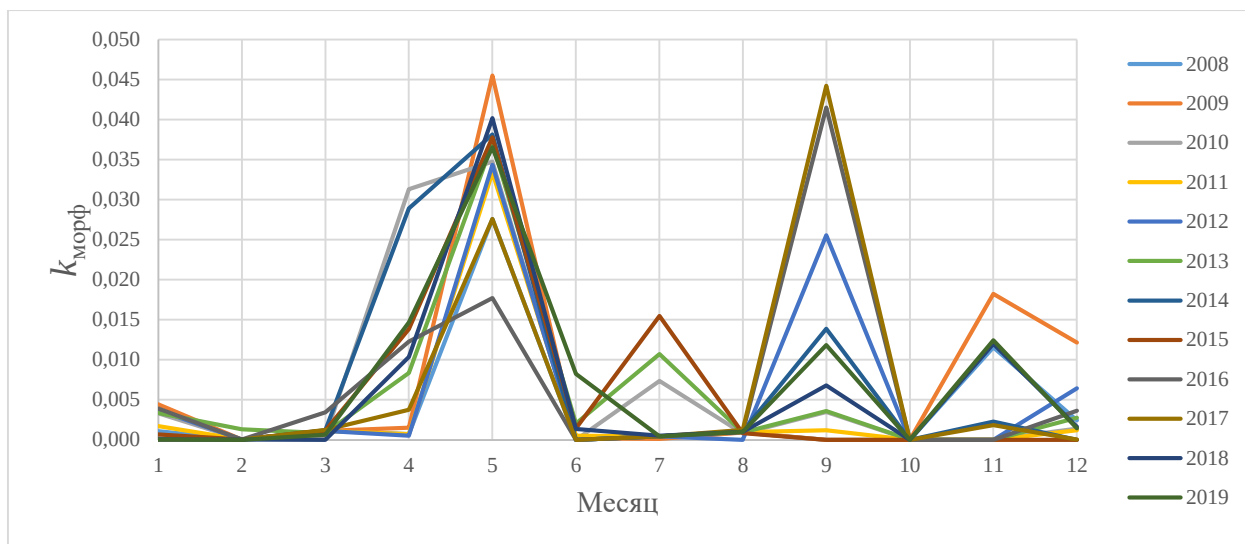


Рисунок 3.1.3.3 – График хода $k_{\text{морф}}$ за 2008 – 2019 гг.

На основе таблицы 3.1.3.1 строится график хода $k_{\text{морф}}$ за 12 лет, чтобы отследить изменчивость коэффициента за данный период. Наибольшие колебания приходятся на май и сентябрь.

Таблица 3.1.3.2 – Оценка расчета уровней воды оз. Лача по критерию S/σ

Год/Период	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Оценка расчета уровней воды оз. Лача по критерию S/σ при параметризации												
2008	0,35	1,21	0,93	0,06	0,15	0,17	0,25	0,37	0,50	0,25	0,53	0,51
2009	0,27	0,19	0,25	0,22	0,06	0,13	0,44	0,25	0,35	0,15	0,69	0,19
2010	0,11	0,12	0,64	0,02	0,12	0,21	0,09	0,34	0,40	0,39	0,27	0,31
2011	0,24	0,27	0,49	0,06	0,15	0,12	0,17	0,87	0,46	0,61	0,69	0,25
2012	0,63	0,16	0,60	0,07	0,19	0,18	0,23	0,30	0,31	0,16	0,12	0,09
2013	0,12	0,33	0,29	0,04	0,15	0,10	0,25	0,17	0,53	0,49	0,13	0,25

Год/Период	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2014	0,24	0,29	0,46	0,05	0,22	0,27	0,21	0,20	0,29	0,97	0,89	1,15
2015	1,09	1,21	0,81	0,08	0,16	0,13	0,48	0,21	0,59	0,35	0,45	0,11
2016	0,13	0,14	0,21	0,04	0,11	0,23	0,52	0,32	0,35	0,22	0,40	0,53
2017	0,35	0,61	0,62	0,07	0,22	0,36	0,37	0,21	0,25	0,26	0,82	0,19
2018	1,14	0,16	0,39	0,06	0,10	0,11	0,21	0,26	0,43	0,24	0,35	0,23
2019	1,02	0,96	0,19	0,05	0,11	0,11	0,38	0,36	0,43	0,10	0,23	0,56
Среднее	0,47	0,47	0,49	0,07	0,14	0,18	0,30	0,32	0,41	0,35	0,46	0,36
Оценка расчета уровней воды оз. Лача по критерию S/σ на независимом материале												
2020	0,86	0,86	0,29	1,13	0,77	0,69	0,43	0,65	0,44	2,18	0,24	0,44
2021	0,56	0,37	0,57	0,12	0,27	0,18	0,37	1,12	1,06	0,45	0,73	0,95
2022	1,70	1,47	0,79	0,17	0,22	0,44	0,35	0,27	0,49	0,92	0,31	0,98

Значение S/σ не должно превышать 0,80 в случае длинного ряда. Таблица выше показывает, что в апробация модели является успешной на 69%. Успешность параметризации модели составляет 91%.

Ниже представлен график фактических и прогнозных значений уровней воды. На рисунке видно, что, в целом, расчетные уровни неплохо описывают природную тенденцию, но основное завышение полученных значений приходится на пик весеннего половодья. Модель учитывает количество воды, принесенное в водоем учтенными реками, и ее отток, но не учитывает подземное и дождевое питание водоема, из-за чего и следуют некоторые погрешности.

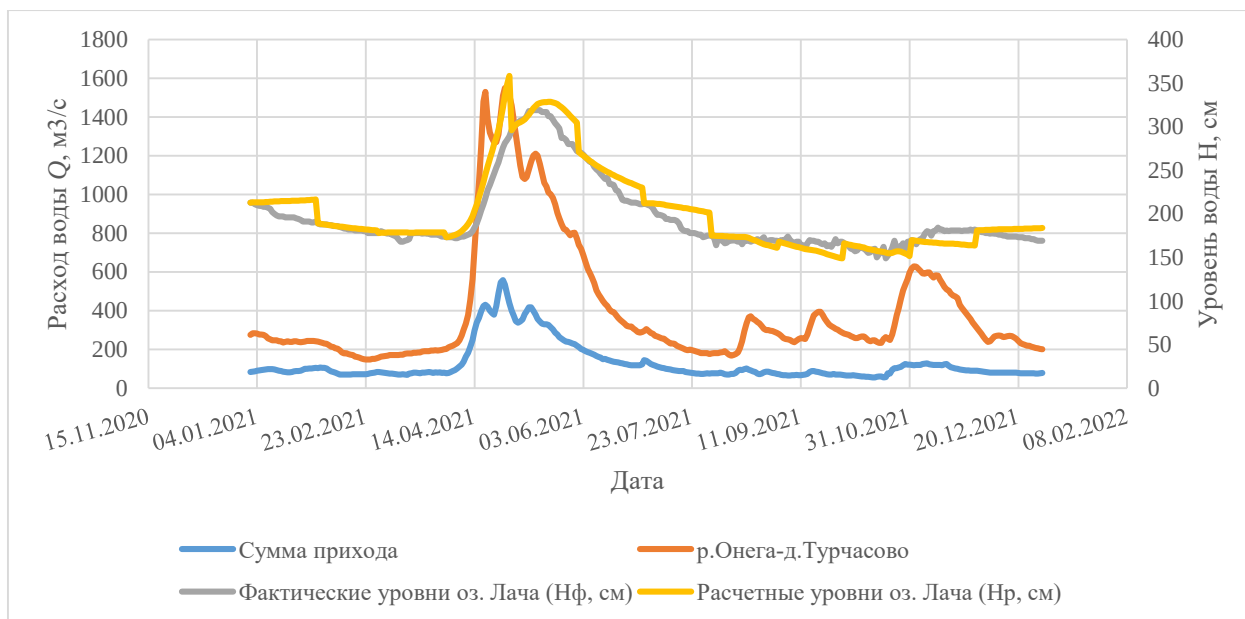


Рисунок 3.1.3.4 – График прогнозных уровней воды на оз. Лаче – с. Нокола за 2021 г.

3.1.4 Модель руслового стока реки Онега

В этом пункте работы были использованы данные о значениях ежедневных уровней воды р.Онега – г.Казаково и р.Онега – г.Порог за 2008 - 2022 гг. Параметризовалась модель для 2008 - 2019 гг. и для трех последних лет выполнялась апробация по усредненному значению параметров a и q . Решение этой задачи производилось при помощи настройки MSExcel “Поиск решения”.

Ниже, в качестве примера, приведен график параметризации уровней воды на р.Онега – г.Порог за апрель 2008 г. Глядя на этот график можно сделать вывод о том, что кривая расчитанных значений хорошо описывает кривую фактических.

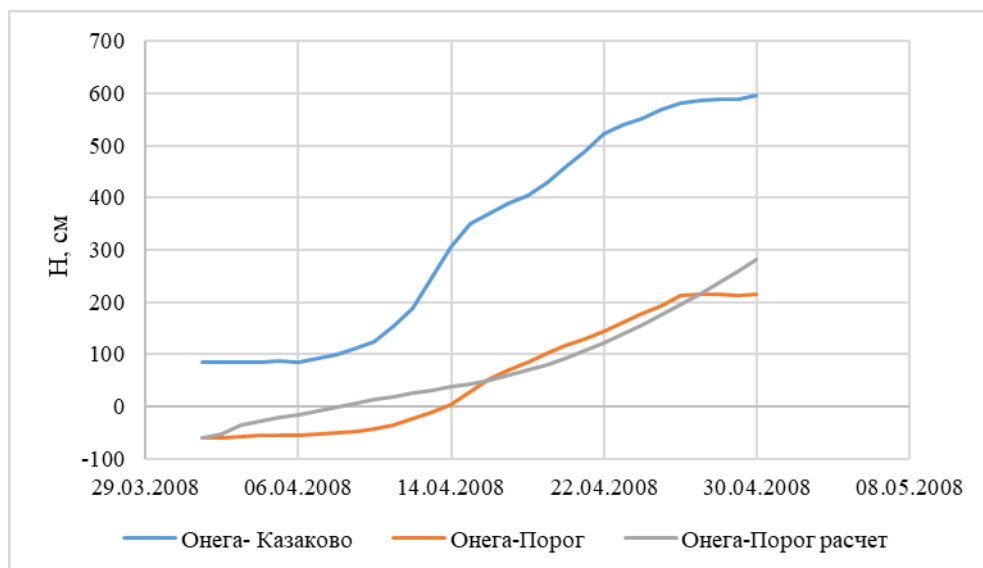


Рисунок 1 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2008 г., $a=11,2$, $q=-0,03$, $S/\sigma =2,11$

Чтобы прогноз оправдался, значение S/σ должно быть меньше 0,80 при наличии длинного ряда наблюдений. Апробация модели в данном случае не является успешной.

3.2 Объекты озера Ильмень

3.2.1 Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдачи

В качестве исходных данных были использованы ежедневные данные приземной температуры воздуха (t , °C), осадков (X , мм), высота снежного покрова (h , см), фактических запасов воды в снежном покрове по материалам маршрутных снегомерных съемок. В данной работе использованы метеорологические данные по метеостанции Старая Русса за период 15 лет (2007 - 2022 гг.)

На этапе работы, по ежедневным данным осадков и расчетных запасов воды в снежном покрове (Таблица 3.2.1.1) – результат расчетов снегонакопления при устойчивом переходе через 0 °C – необходимо было рассчитать водоотдачу для всех лет наблюдений. В результате были получены хронологические графики (Рисунок 3.2.1.1), представленные ниже в качестве примера.

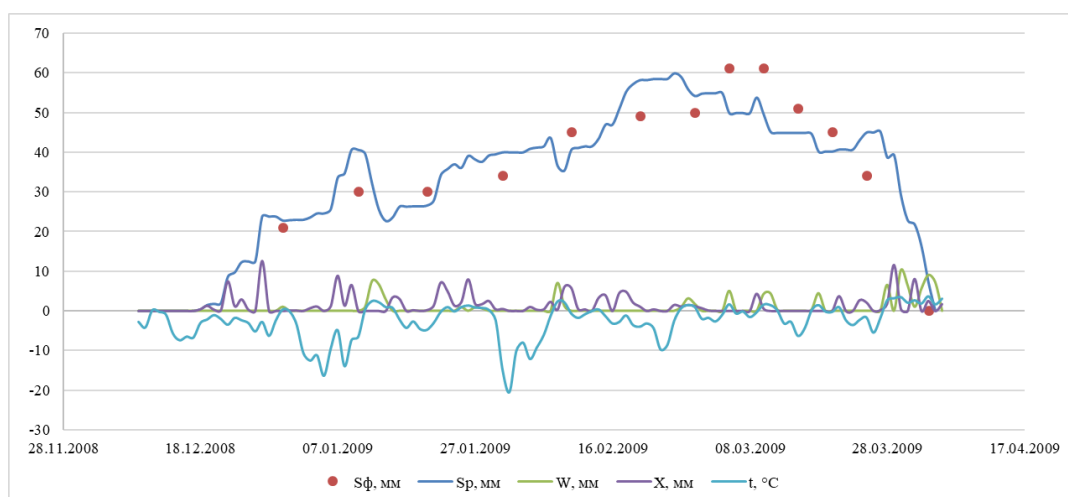


Рисунок 3.2.1.1 – Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге, водоотдачи из снежного покрова, а также осадков и температур станции р. Ловать – г. Старая Русса для холодного периода 2008 - 2009 гг.

Глядя на этот график можно сделать вывод о том, что расчетные значения – модельные данные хорошо согласуются с фактическими.

Ниже приведен фрагмент таблицы и рассчитанные значения водоотдачи.

Таблица 3.2.1.1 – Отрывок из собранной базы данных станции

р. Ловать – г. Старая Русса для холодного периода 2008 - 2009 гг.

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
05.12.2008	1,2	12,2				
06.12.2008	2,4	3				
07.12.2008	2,3	6,5				
08.12.2008	-0,8	0	0		0	
09.12.2008	-2,8	0			0	0
10.12.2008	-4,2	0			0	0
11.12.2008	0,1	0			0	0
12.12.2008	-0,3	0			0	0
13.12.2008	-1	0			0	0
14.12.2008	-5,7	0			0	0
15.12.2008	-7,4	0			0	0

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
16.12.2008	-6,5	0			0	0
17.12.2008	-6,7	0			0	0
18.12.2008	-3,1	0,4			0,4	0
19.12.2008	-2,2	1,3			1,5	0
20.12.2008	-1,1	0,3			1,8	0
21.12.2008	-2,1	0,2			2	0
22.12.2008	-3,5	7,4			8,6	0
23.12.2008	-1,8	1,2			9,7	0
24.12.2008	-2,4	2,9			12,3	0
25.12.2008	-3,1	0,3			12,5	0
26.12.2008	-5,2	0			12,5	0
27.12.2008	-2,8	12,5			23,8	0
28.12.2008	-6,3	0			23,8	0
29.12.2008	-2,4	0			23,8	0
30.12.2008	0,3	0		21	22,8	1
31.12.2008	-0,2	0,1			22,9	0
01.01.2009	-3,4	0,1			23	0
02.01.2009	-10,6	0			23	0
03.01.2009	-12,5	0,7			23,6	0
04.01.2009	-11,2	1,1			24,6	0
05.01.2009	-16,3	0			24,6	0
06.01.2009	-9,4	1,2			25,7	0
07.01.2009	-4,9	8,8			33,6	0
08.01.2009	-13,9	1,3			34,7	0
09.01.2009	-7,4	6,5			40,6	0
10.01.2009	-6,5	0		30	40,6	0
11.01.2009	0,3	0			39,6	1
12.01.2009	2,4	0			32,1	7,5
13.01.2009	2,1	0			25,5	6,6

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
14.01.2009	0,9	0			22,7	2,8
15.01.2009	0,7	3,4			23,6	0
16.01.2009	-2,2	3			26,3	0
17.01.2009	-4,3	0			26,3	0
18.01.2009	-2,7	0,2			26,4	0
19.01.2009	-4,6	0			26,4	0
20.01.2009	-4,8	0,2		30	26,6	0
21.01.2009	-3	1,4			27,9	0
22.01.2009	-0,3	7,1			34,2	0
23.01.2009	0,9	4,9			35,8	0
24.01.2009	-0,2	1,3			37	0
25.01.2009	0,9	2,2			36,1	0,9
26.01.2009	1,3	7,9			39,1	0
27.01.2009	0,8	1,8			38,2	0,9
28.01.2009	0,7	1,7			37,6	0,6
29.01.2009	0,2	2,5			39,2	0
30.01.2009	-2,4	0,4			39,5	0
31.01.2009	-14,8	0,5		34	40	0
01.02.2009	-20,4	0			40	0
02.02.2009	-10,1	0			40	0
03.02.2009	-8	0			40	0
04.02.2009	-12,1	1			40,9	0
05.02.2009	-9,2	0,3			41,2	0
06.02.2009	-6,1	0,4			41,5	0
07.02.2009	-1,3	2,3			43,6	0
08.02.2009	2,3	0,3			36,6	7
09.02.2009	2,1	6			35,4	1,2
10.02.2009	-0,7	5,8		45	40,6	0
11.02.2009	-1,8	0,5			41,1	0

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
12.02.2009	-0,9	0,4			41,5	0
13.02.2009	-0,1	0			41,5	0
14.02.2009	0,3	3,3			43,5	0
15.02.2009	-1,4	3,9			47	0
16.02.2009	-3,2	0			47	0
17.02.2009	-2,8	4,5			51	0
18.02.2009	-1,2	4,8			55,3	0
19.02.2009	-3,6	2,1			57,2	0
20.02.2009	-4	1,1		49	58,2	0
21.02.2009	-3,2	0			58,2	0
22.02.2009	-4,4	0,4			58,5	0
23.02.2009	-9,7	0			58,5	0
24.02.2009	-8,6	0			58,5	0
25.02.2009	-2,5	1,5			59,9	0
26.02.2009	0,6	1,1			59	0,9
27.02.2009	1,4	1,5			55,9	3,1
28.02.2009	0,9	1,2		50	54,2	1,7
01.03.2009	-2	0,7			54,8	0
02.03.2009	-1,8	0,1			54,9	0
03.03.2009	-2,7	0			54,9	0
04.03.2009	-1	0			54,9	0
05.03.2009	1,6	0		61	49,9	5
06.03.2009	-0,7	0			49,9	0
07.03.2009	-0,2	0			49,9	0
08.03.2009	-1,6	0			49,9	0
09.03.2009	-0,4	4,3			53,8	0
10.03.2009	1,5	0,6		61	49,6	4,2
11.03.2009	1,4	0			45,2	4,4
12.03.2009	0,1	0			44,9	0,3

Дата	t, °C	X, мм	Устойчивый переход через 0 °C	Sф, мм	Sp, мм	W, мм
13.03.2009	-3,2	0			44,9	0
14.03.2009	-2,8	0			44,9	0
15.03.2009	-6,3	0		51	44,9	0
16.03.2009	-4,4	0			44,9	0
17.03.2009	0,1	0			44,6	0,3
18.03.2009	1,4	0			40,2	4,4
19.03.2009	-0,2	0			40,2	0
20.03.2009	-0,3	0		45	40,2	0
21.03.2009	0,9	3,7			40,7	0
22.03.2009	-2,4	0			40,7	0
23.03.2009	-3,6	0			40,7	0
24.03.2009	-2,3	2,7			43,1	0
25.03.2009	-1,7	2,1		34	45	0
26.03.2009	-5,5	0			45	0
27.03.2009	-1,9	0,2			45,2	0
28.03.2009	2,6	1,8	1		38,7	6,5
29.03.2009	3,1	11,5			39,3	0
30.03.2009	3,4	0,5			29,1	10,2
31.03.2009	2	0			22,8	6,3
01.04.2009	2,6	8			21,8	1
02.04.2009	1,8	0			16,2	5,6
03.04.2009	3,6	2,5		0	7,2	9
04.04.2009	1,6	0			0	7,2
05.12.2008	1,2	12,2				
06.12.2008	2,4	3				
07.12.2008	2,3	6,5				

3.2.2 Модель формирования стока реки Ловать

В этом пункте работы исследовался сток р. Ловать за холодный период, то есть за период половодья. Ко внешним воздействиям относятся значения осредненных температур и поступающих на водосбор осадков за 2008 - 2017 гг. по метеостанции Старая Русса.

За начало выделенного периода половодья принималась дата за день до устойчивого перехода через 0 °С. Затем выполнялась параметризация модели за все года, машинным образом находились параметры k и τ . Позже по расчетной формуле вычислялись значения расходов $Q_{\text{расч}}$. Когда подбор параметров подходит к концу, полученные значения за 2008 - 2017 гг. усредняются и уже эти результаты используются для прогнозирования на 2018- 2019 гг.

Ниже, в качестве примера, представлен график за 2009 г.

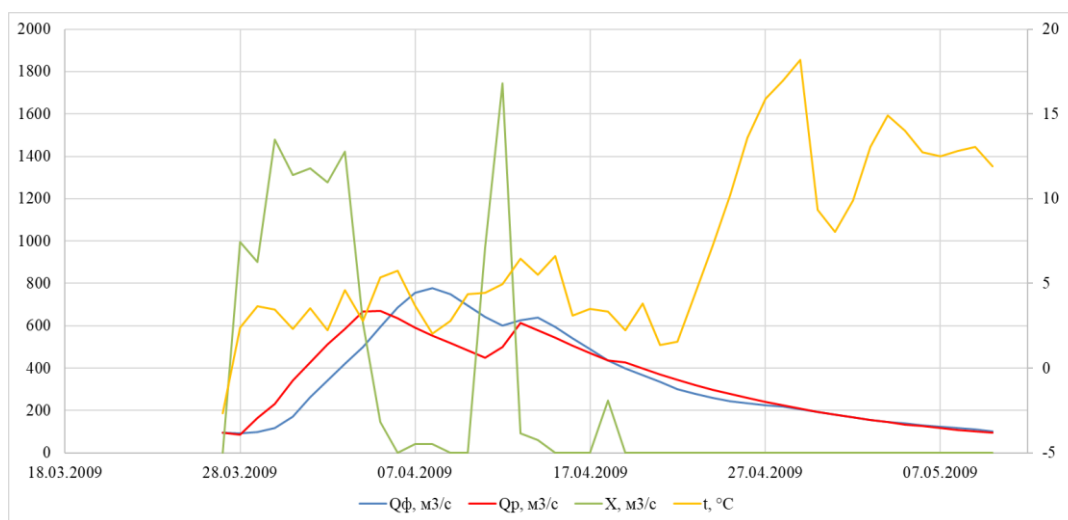


Рисунок 3.2.2.1 – График параметризации расходов воды на

р. Ловать – п. Холм за 2009 г., $k = 1.2198$, $\tau = 14$ сут., $S/\sigma = 0.45$

Таблица 3.2.2.1 – Численные значения параметров k и τ , S/σ за весь период, полученные при параметризации модели руслового стока

Год	k	τ	S/σ	k_p	τ_p	S/σ_p
2008	0,8033	16	1,49			
2009	1,2198	14	0,45			

Год	k	τ	S/ σ	k_p	τ_p	S/ σ_p
2010	0,4625	36	1,28			
2011	1,6695	43	1,29			
2012	0,9505	11	0,82			
2013	0,1990	10	1,25			
2014	1,9758	305	0,90			
2015	0,5877	7	1,12			
2016	1,4398	90	0,84			
2017	0,6244	11	1,52			
2018	0,7769	8	1,23	0,9932	54	1,41
2019	1,8897	14	0,37	0,9932	54	1,17

В лучшем случае, чтобы прогноз оправдался, значение S/ σ должно быть меньше 0,80 при наличии длинного ряда наблюдений. Как видно из таблицы, апробация модели в данном случае не является успешной.

3.2.3 Модель озера Ильмень

В качестве внешнего воздействия, для модели водоема были использованы данные о значениях уровней воды оз. Ильмень – п. Коростынь за 2008 - 2019 гг. и значения расходов втекающих рек за тот же временной отрезок.

Параметризовалась модель, то есть решалась обратная задача, для 2008 - 2019 гг. и для двух последних лет выполнялась апробация по усредненному значению $k_{\text{морф}}$. Решение этой задачи производилось при помощи настройки MSExcel “Поиск решения”.

Ниже, в качестве примера, приведен график параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2008 г. Глядя на этот график можно сделать вывод о том, что кривая рассчитанных значений не сильно отклоняется от кривой фактических значений.

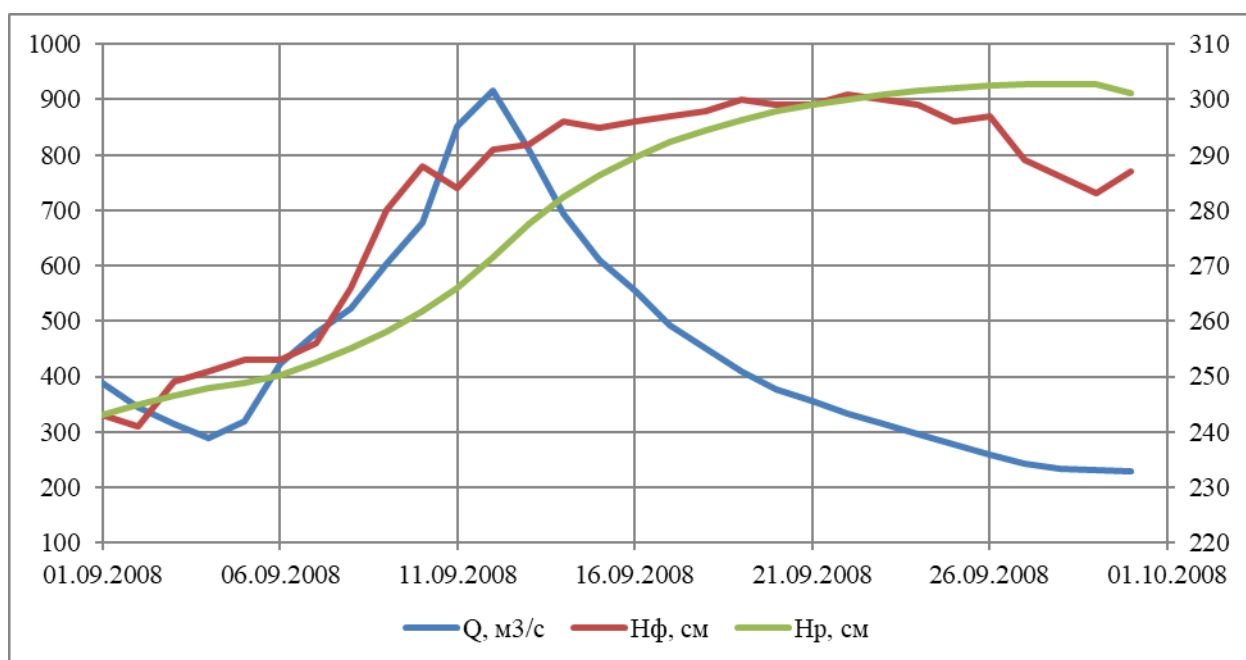


Рисунок 3.2.3.1 – График параметризации уровней воды на

оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2008 г., $k = 0.0074$, $S/\sigma = 0.26$

Таблица 3.2.3.1 – Оценка расчета уровней воды оз. Ильмень по критерию S/σ

Год/Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2008	0,26	0,27	0,05	0,10	0,16	0,14	0,15	0,50	0,63	0,32	0,74	0,18
2009	0,05	0,40	0,17	0,06	0,41	0,45	0,15	0,29	0,24	0,08	0,14	0,18
2010	0,09	0,07	0,17	0,24	0,20	0,14	0,10	0,25	0,63	0,73	0,21	0,38
2011	0,33	0,88	0,08	0,10	0,15	0,06	0,09	0,31	0,41	0,33	0,64	0,20
2012	0,50	0,06	0,14	0,08	0,16	0,18	0,12	0,23	0,84	0,36	0,10	1,04
2013	0,41	0,15	0,11	0,21	2,26	0,17	0,13	0,13	0,41	0,60	0,34	0,22
2014	0,28	0,19	0,25	0,75	0,52	0,31	0,08	0,30	0,36	1,21	0,63	0,88
2015	0,87	0,53	0,25	0,19	0,15	0,13	0,28	0,29	0,98	0,77	0,82	0,36
2016	1,26	0,38	0,63	0,23	0,47	0,19	0,99	0,51	0,22	1,27	0,62	1,03
2017	1,87	0,23	0,45	0,27	0,32	0,17	1,88	0,54	0,43	1,03	0,99	1,11
2018	0,41	0,34	0,24	0,09	0,30	0,17	0,21	0,35	0,35	0,89	1,39	0,69
2019	0,81	1,13	0,30	0,60	0,27	0,26	0,61	0,25	0,67	0,30	0,24	0,75
2018	0,42	0,38	0,24	0,11	0,60	0,19	0,43	0,56	0,35	3,20	1,44	3,78

Год/Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2019	3,80	6,34	0,39	0,80	0,38	0,32	1,73	0,30	0,78	0,33	0,34	0,99

В лучшем случае, чтобы прогноз оправдался, значение S/σ не должно превышать 0,80 при наличии длинного ряда, превышающего 25 лет наблюдений. Как видно из таблицы, апробация модели в большинстве случаев является успешной.

Заключение

Объектами исследования в данной работе были озеро Ильмень, находящееся в западной части Новгородской области и озеро Лача на юго-западе Архангельской области. В процессе работы были изучены физико-географические особенности озер Ильмень и Лача, собраны все необходимые для расчетов метеорологические и гидрологические данные, выполнена параметризация моделей формирования запасов воды в снеге и водоотдачи, формирования стока, модели водоема и руслового стока, произведена апробация моделей формирования стока, водоема и руслового стока на независимом материале, выполнена оценка методик прогнозирования согласно отношению - критерию применимости и качества S/σ .

Список использованных источников

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru/>
2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <http://meteo.ru/>
3. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е исправ. и доп. Учебник. – СПб., изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
4. Лача – Википедия [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Лача>
5. Озеро Лача Архангельской области [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://www.tourister.ru/world/europe/russia/city/kargopol/lakes/38818>
6. Ильмень – Википедия [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ильмень>
7. Библиофонд: электронная библиотека студента. Гидрологический режим и водный баланс озера Ильмень. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=794795>
8. Малушко А. И. Регулирующая способность озера Ильмень и его водосбора [Текст] / А. И. Малушко, Н. В. Мякишева СПб, 2018 г. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_14a96dc8c2e5459ebf3d343ee9f5c255.pdf;
9. allbest. Выбери лучшее! Гидрологический режим и водный баланс озера Ильмень. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL:

https://knowledge.allbest.ru/geology/2c0a65625a2bd69b4d53b89521206c27_0.html;

10. StudFiles: файловый архив студентов. Курс «Моделирование гидрологических процессов». Лекция 7. Тема: Модели снеготаяния. [Электронный ресурс] // Web page Source user guide. – URL: <https://studfile.net/preview/5429022/>
11. Коваленко В. В. Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть I. Динамические модели» (на базе языка C++). Учебное пособие. [Текст] / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – 147 с.;
12. Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Гидрологические прогнозы. Конспект лекций / Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. –Санкт-Петербург : РГГМУ, 2021. – 92 с.

Приложение 1 Хронологические графики фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2007 по 2021 г.

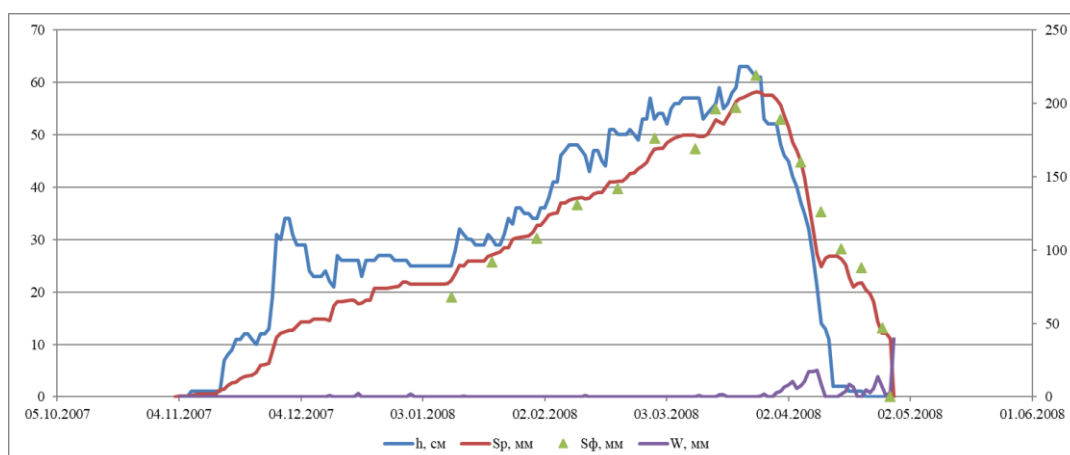


Рисунок 1 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2007 по 2008 г.

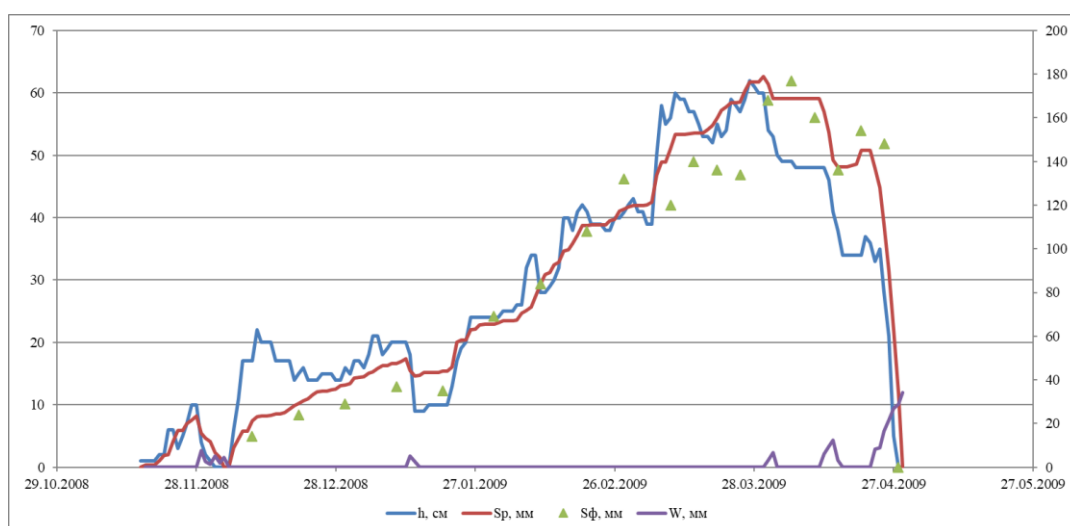


Рисунок 2 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2008 по 2009 г.

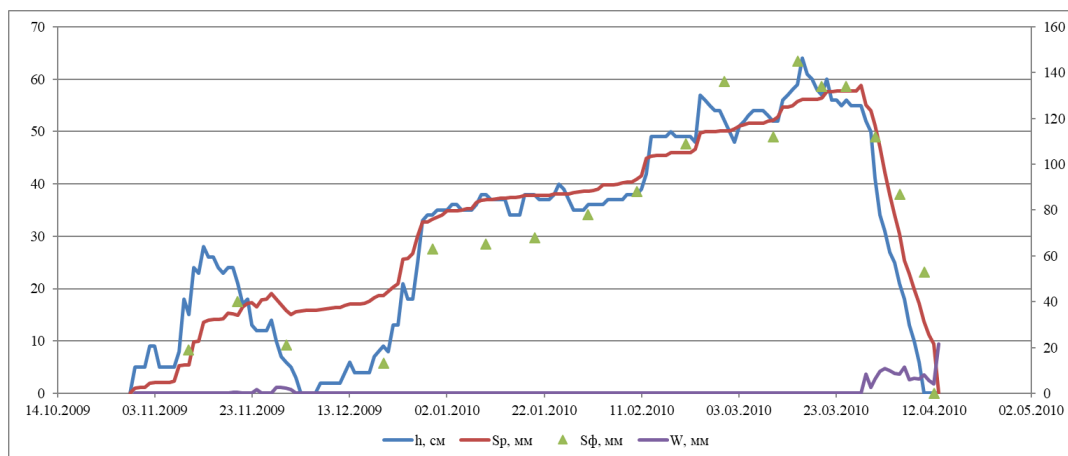


Рисунок 3 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2009 по 2010 г.

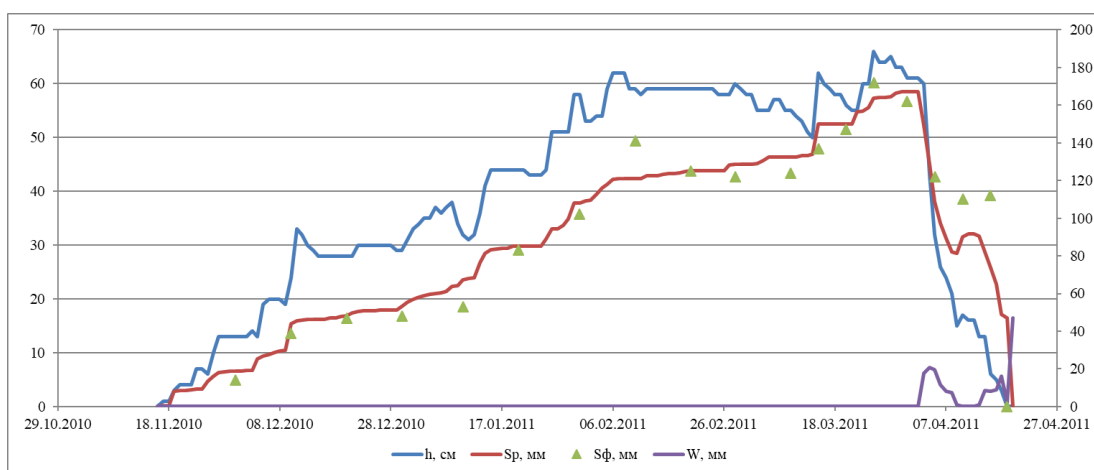


Рисунок 4 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2010 по 2011 г.

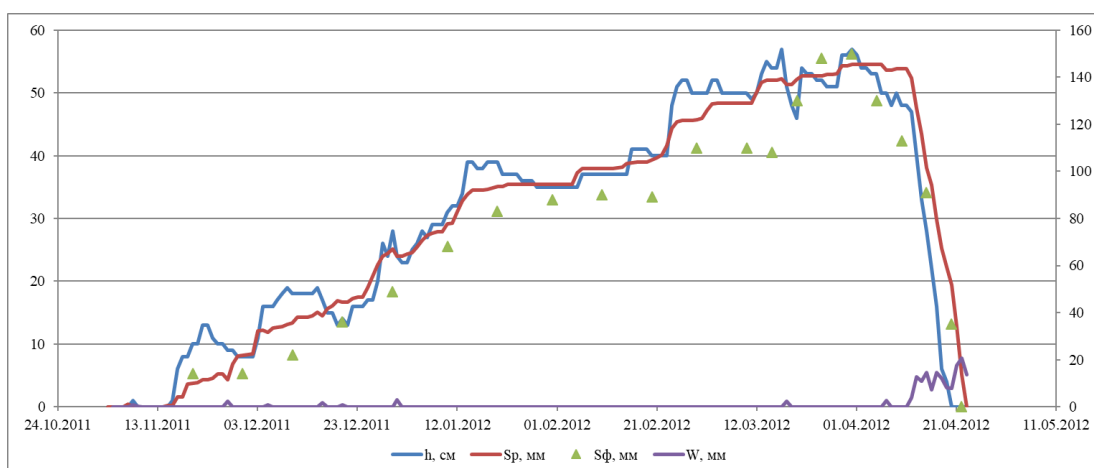


Рисунок 5 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2011 по 2012 г.

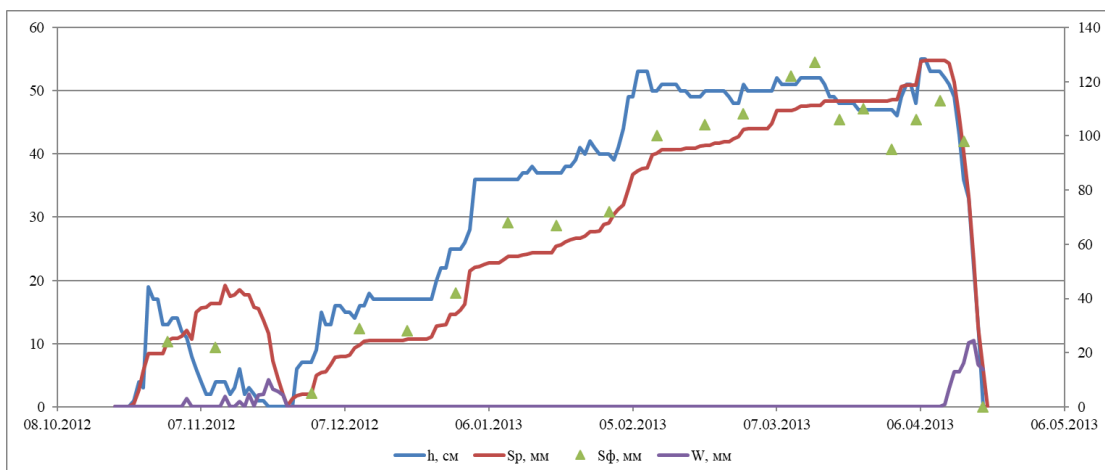


Рисунок 6 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2012 по 2013 г.

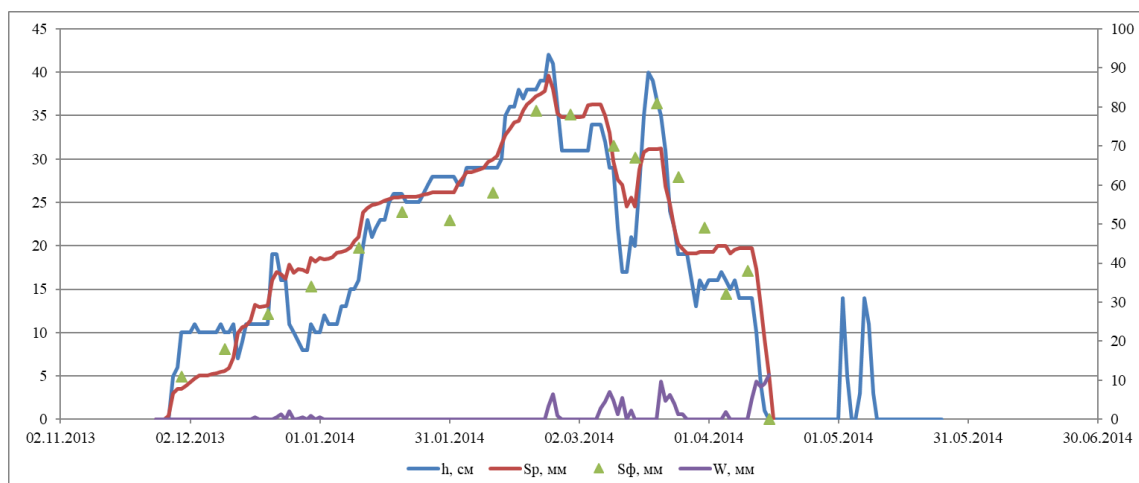


Рисунок 7 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2013 по 2014 г.

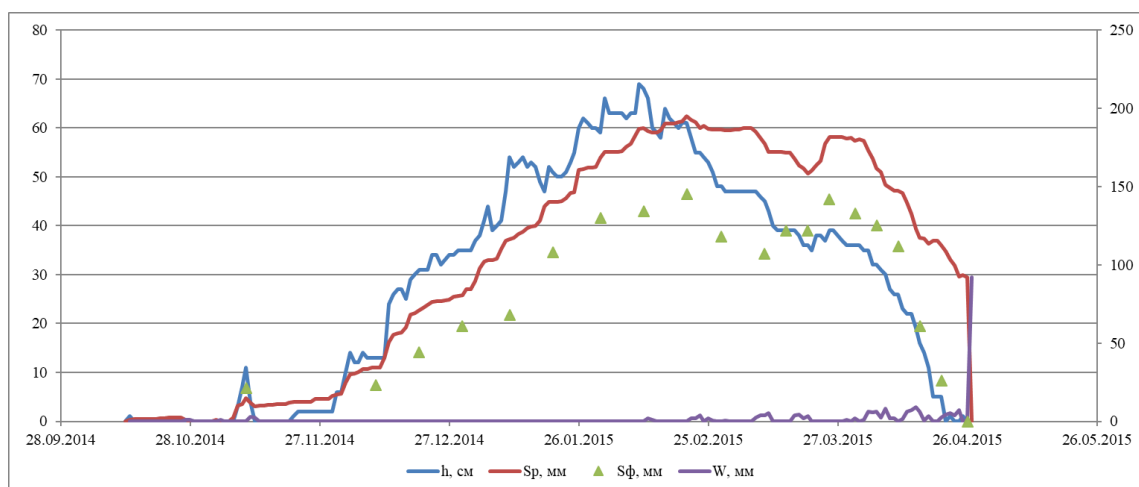


Рисунок 8 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2014 по 2015 г.

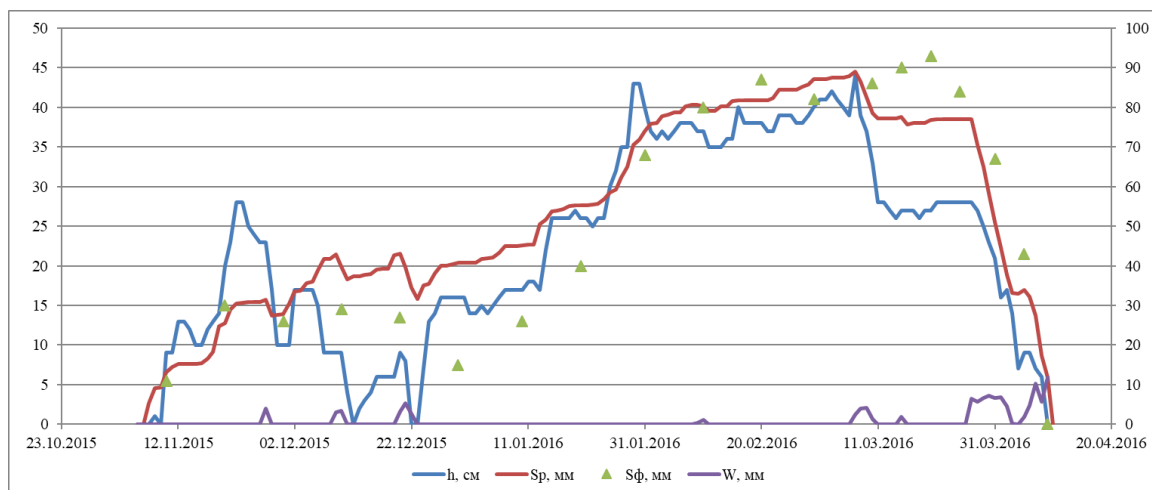


Рисунок 9 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2015 по 2016 г.

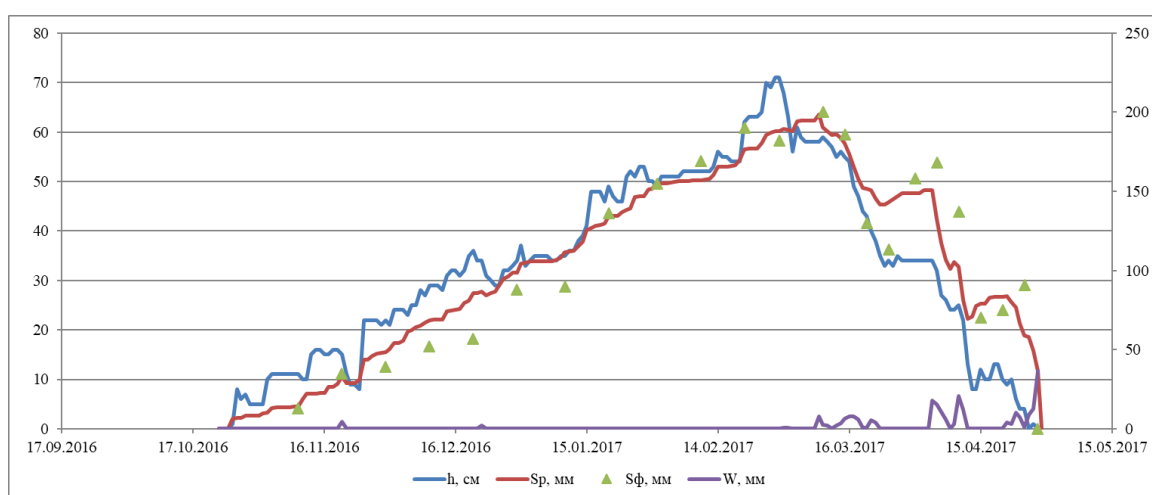


Рисунок 10 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2016 по 2017 г.

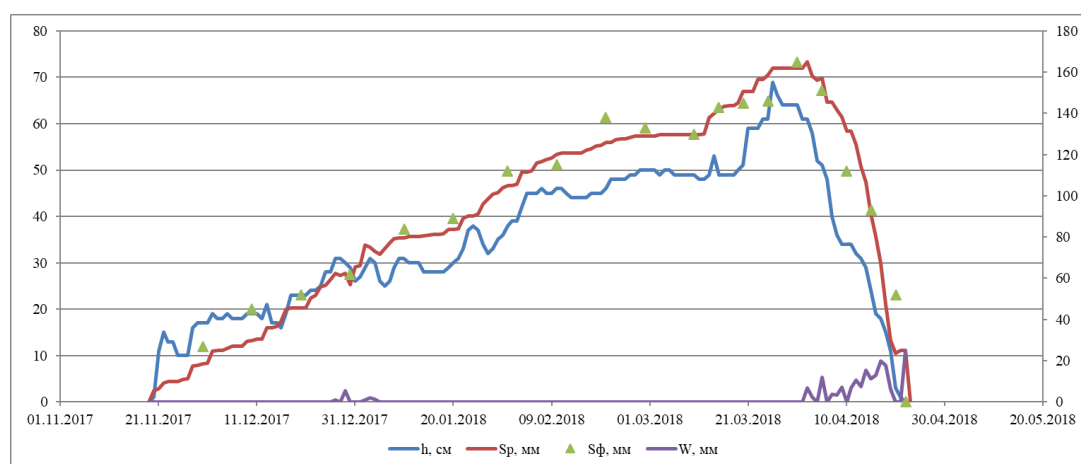


Рисунок 11 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2017 по 2018 г.

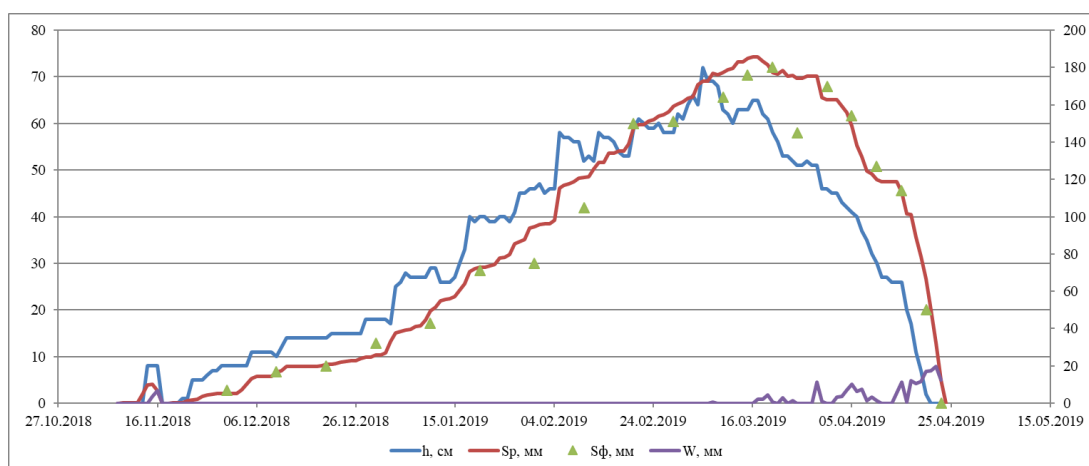


Рисунок 12 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2018 по 2019 г.

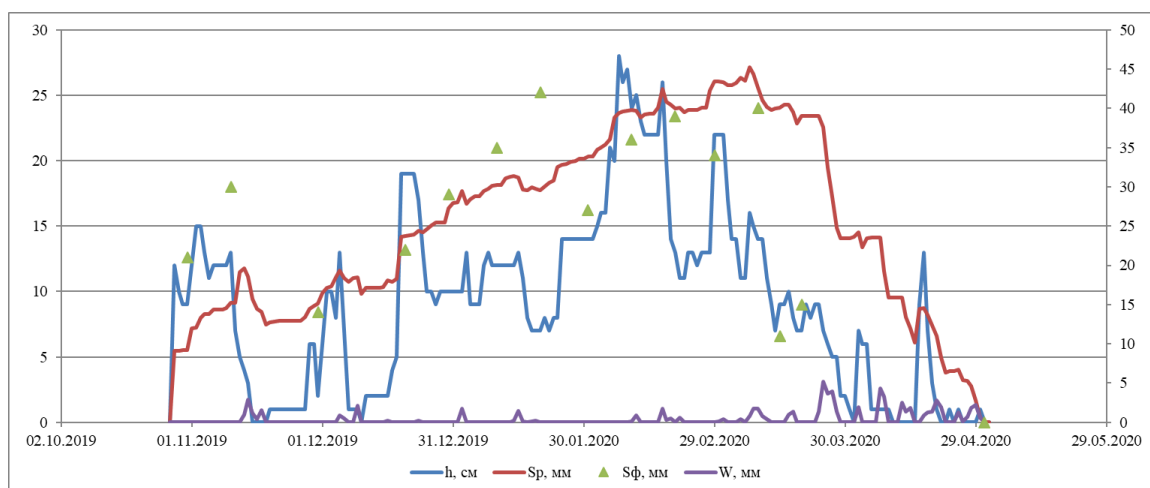


Рисунок 13 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2019 по 2020 г.

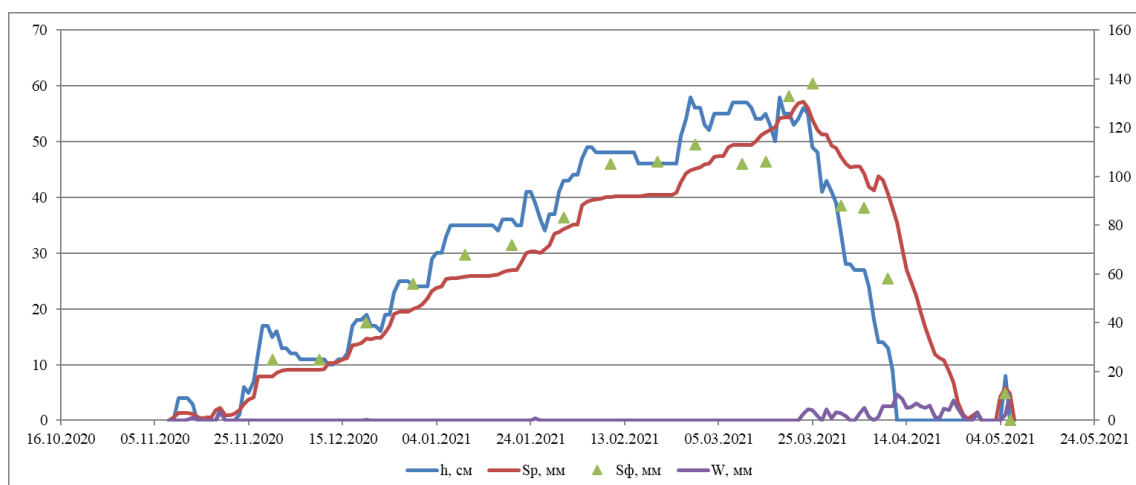


Рисунок 14 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2020 по 2021 г.

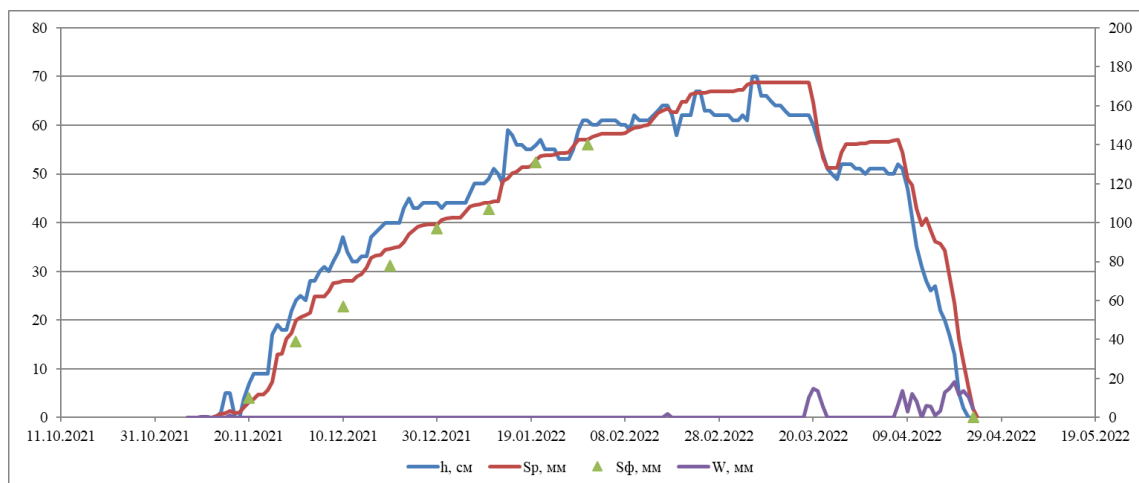


Рисунок 15 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Каргополь для холодного периода с 2021 по 2022 г.

Приложение 2 Хронологические графики фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2007 по 2019 г.

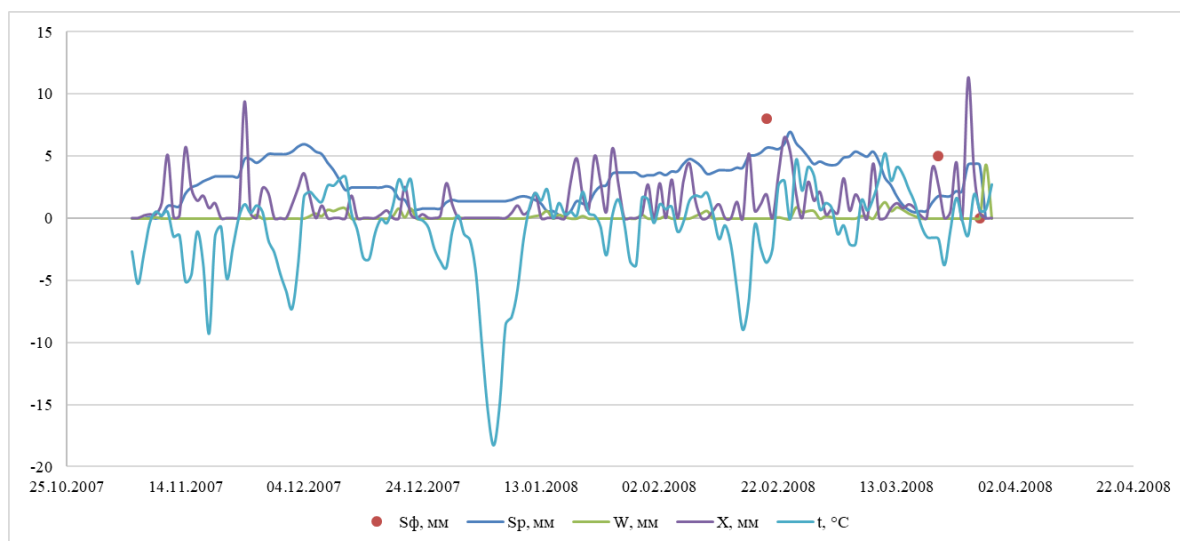


Рисунок 1 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2007 по 2008 г.

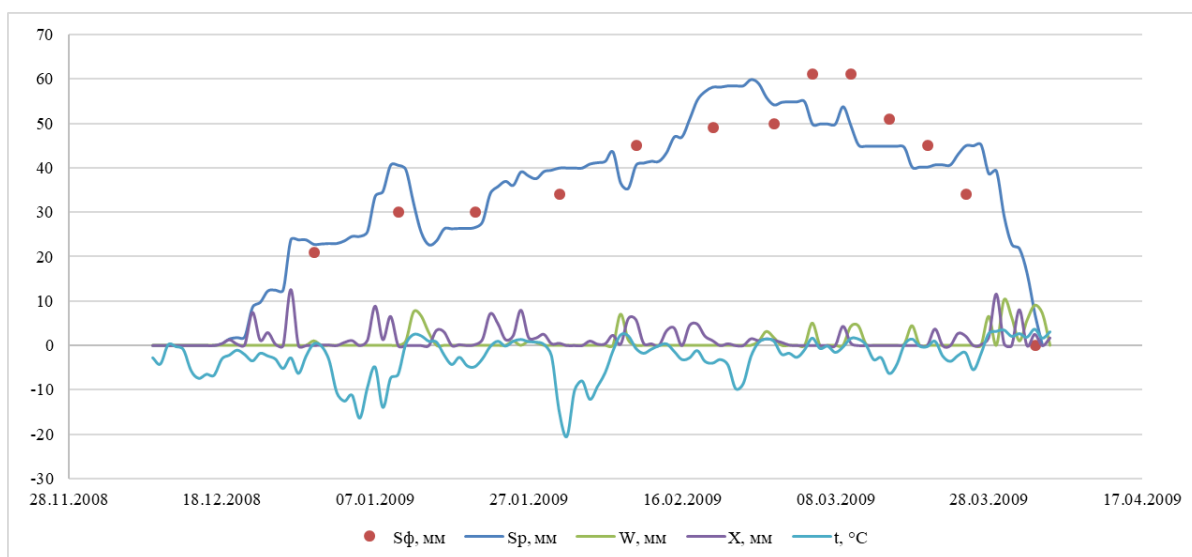


Рисунок 2 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2008 по 2009 г.

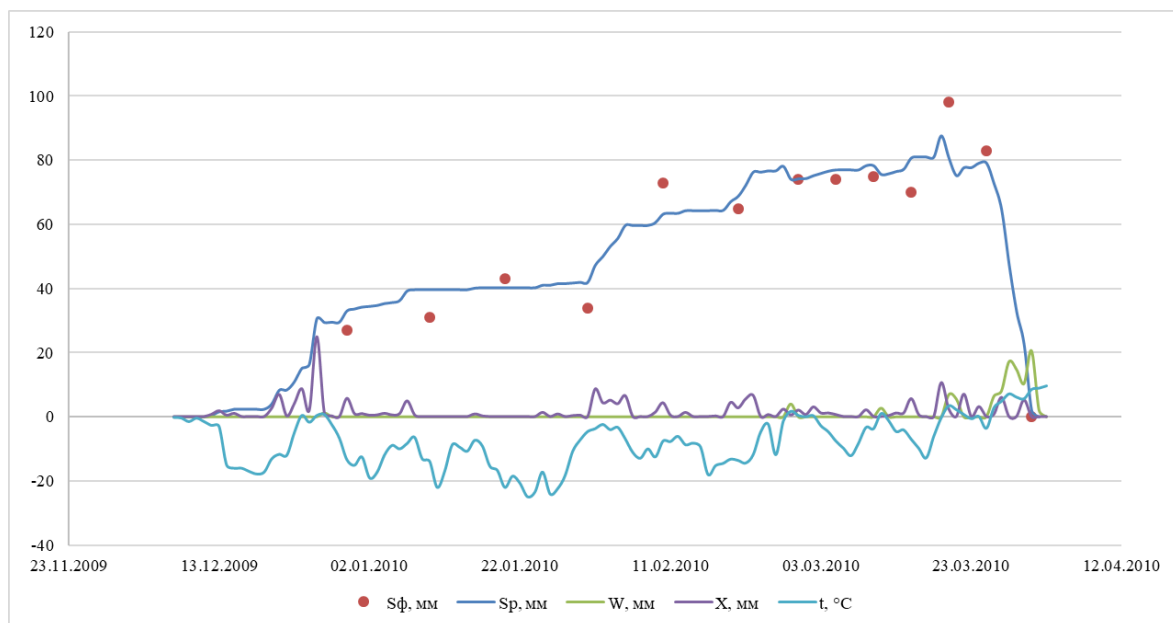


Рисунок 3 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2009 по 2010 г.

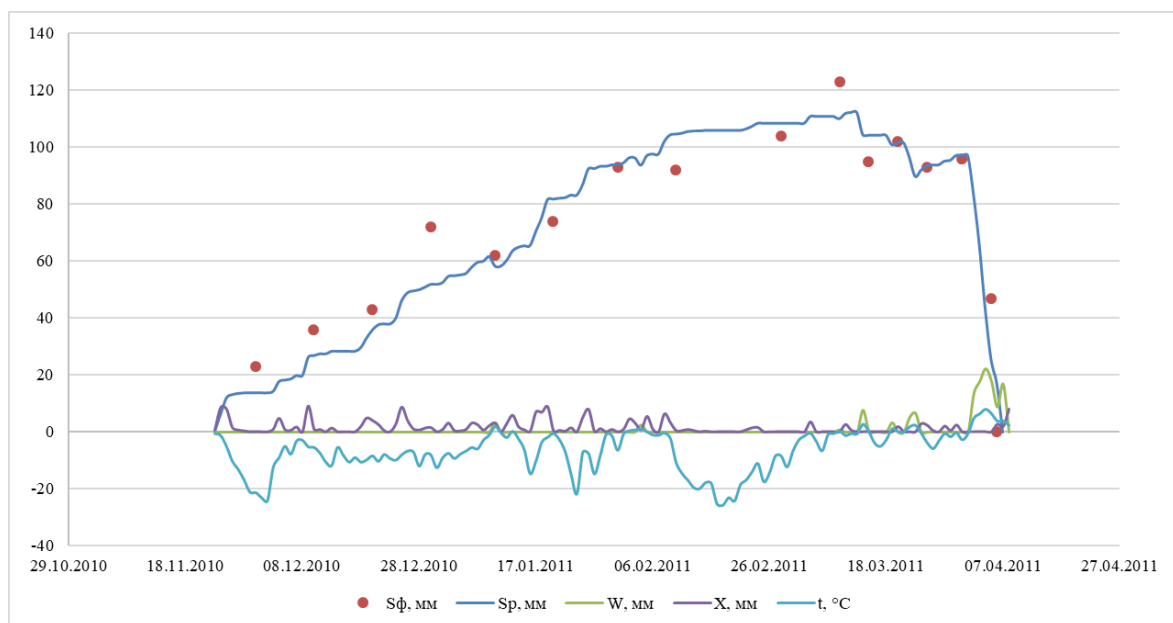


Рисунок 4 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2010 по 2011 г.

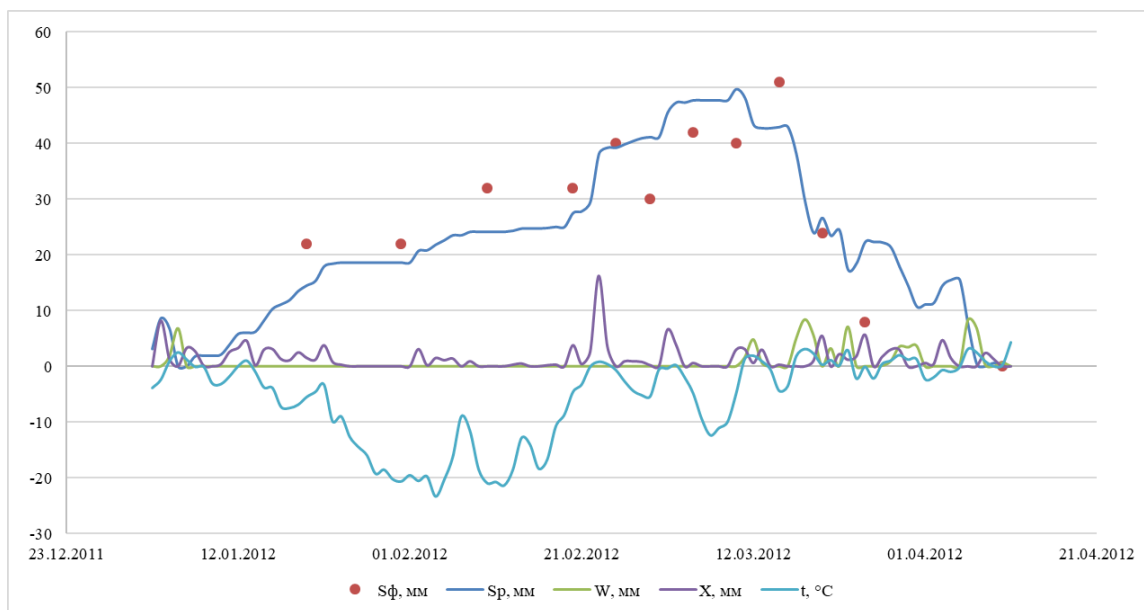


Рисунок 5 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2011 по 2012 г.

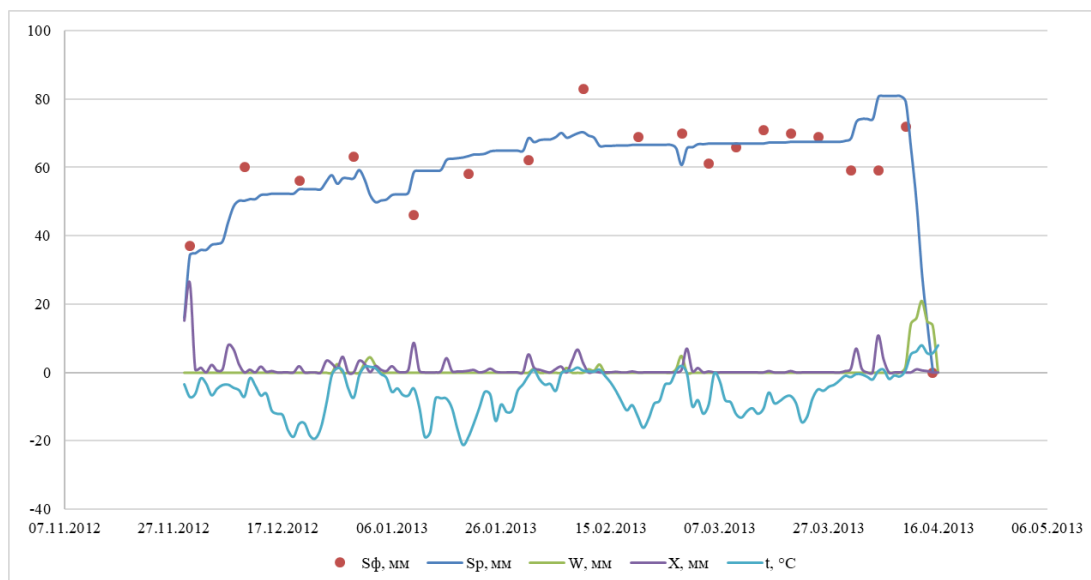


Рисунок 6 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2012 по 2013 г.

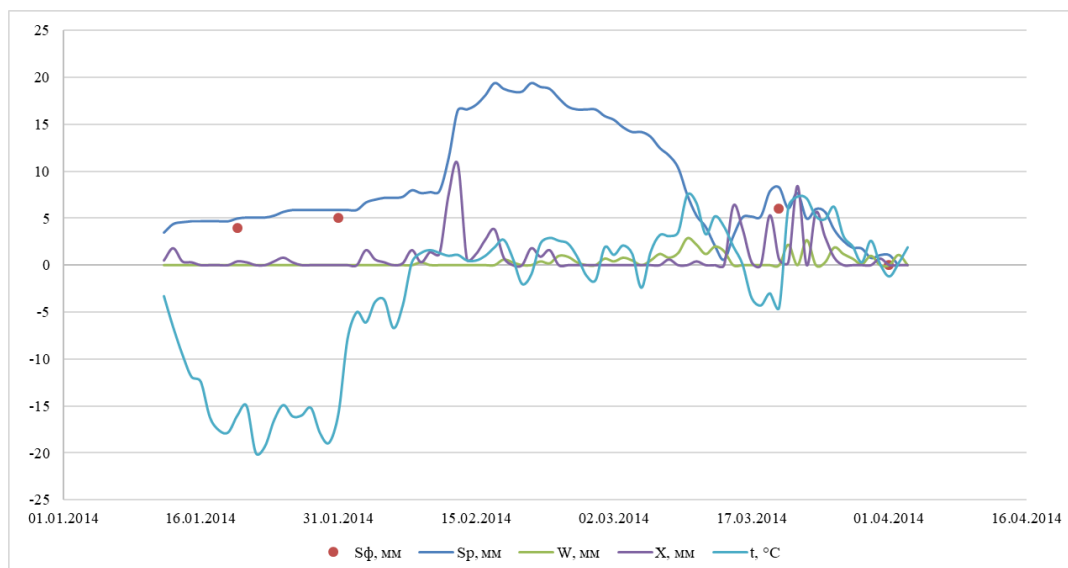


Рисунок 7 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2013 по 2014 г.

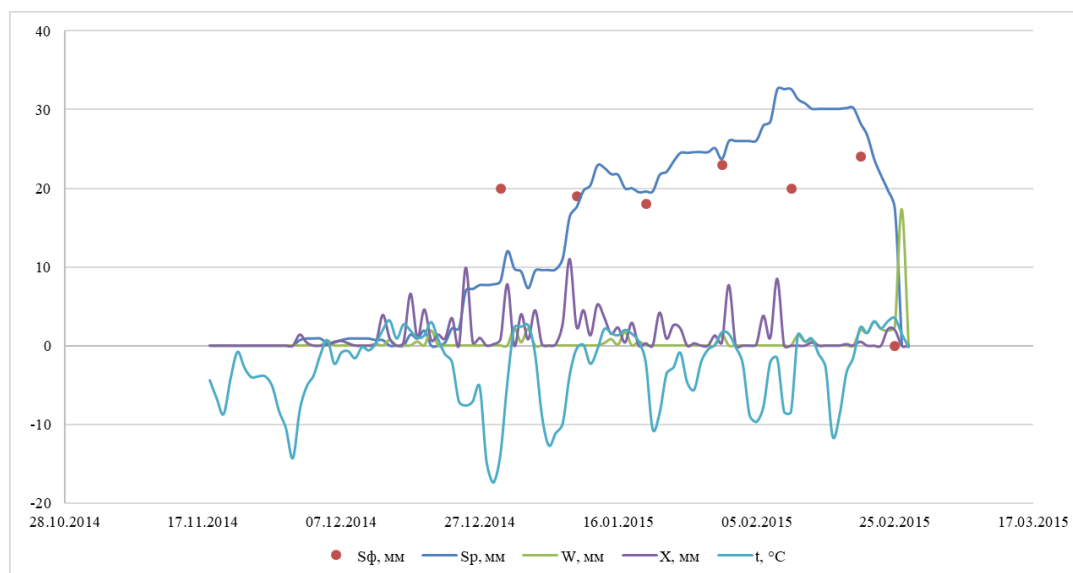


Рисунок 8 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2014 по 2015 г.

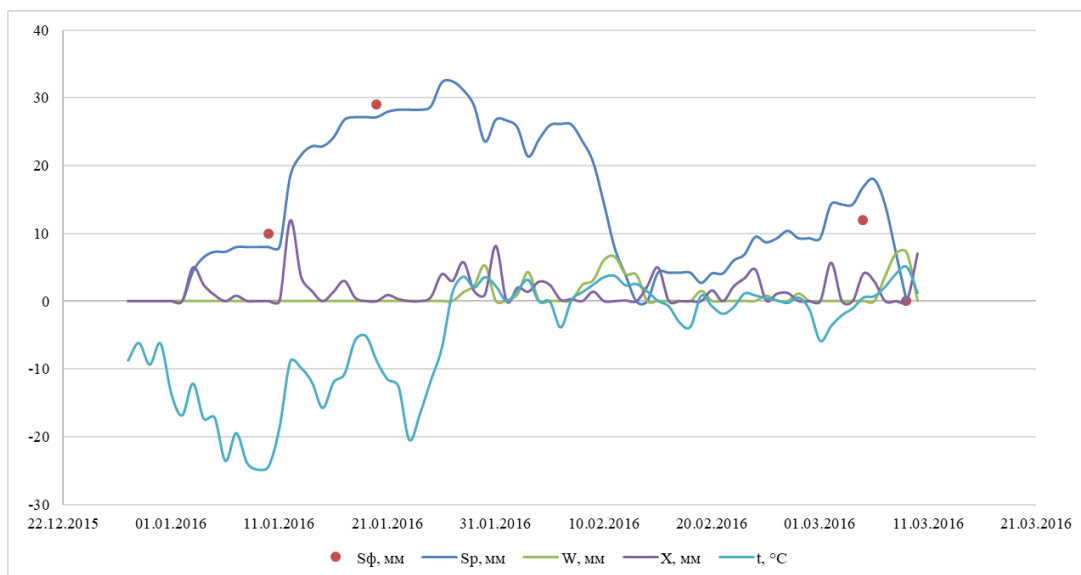


Рисунок 9 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2015 по 2016 г.

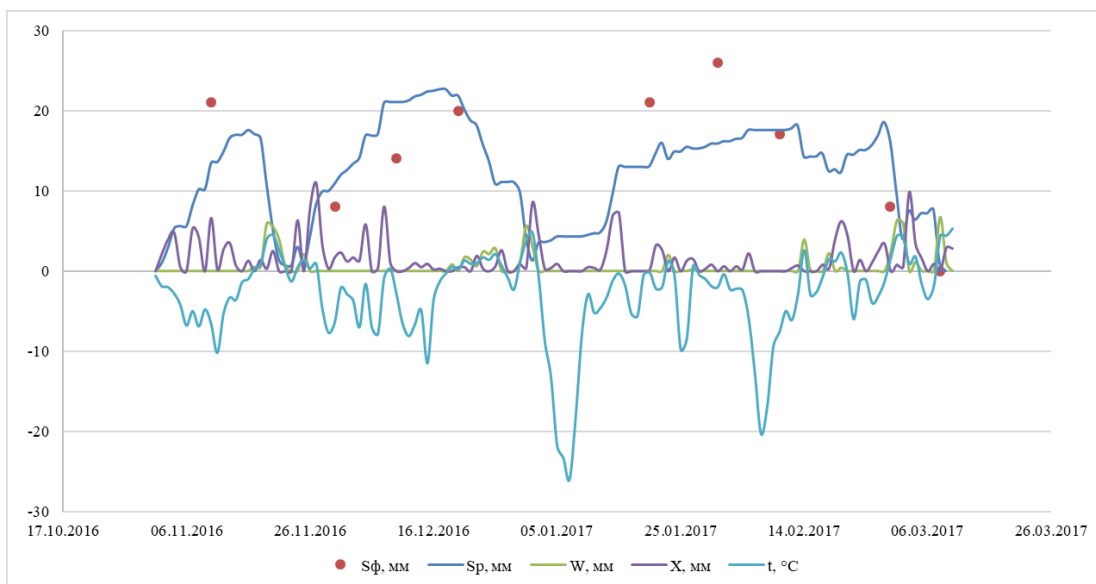


Рисунок 10 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2016 по 2017 г.

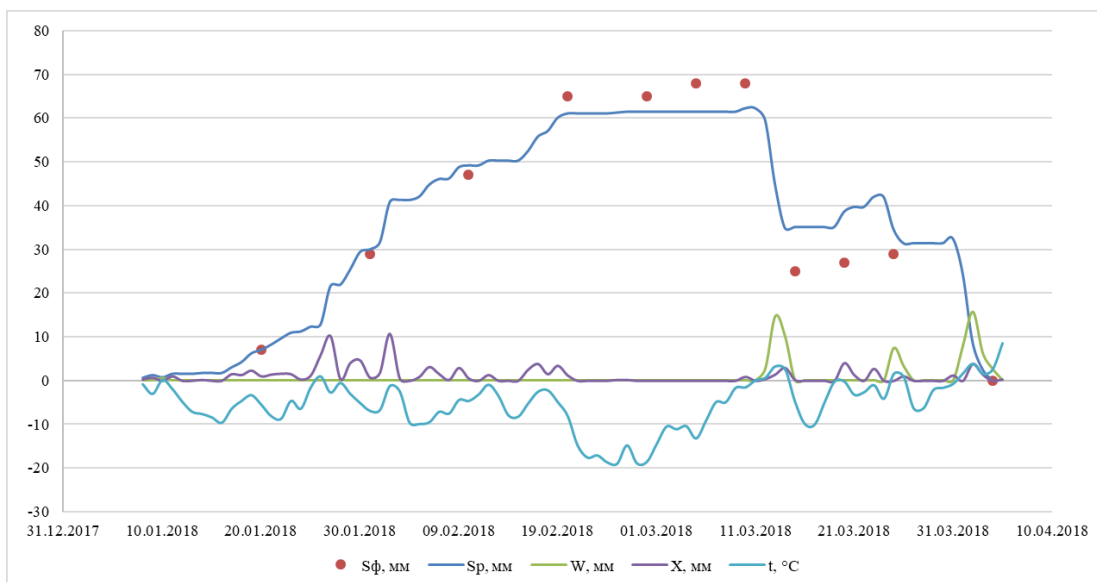


Рисунок 11 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2017 по 2018 г.

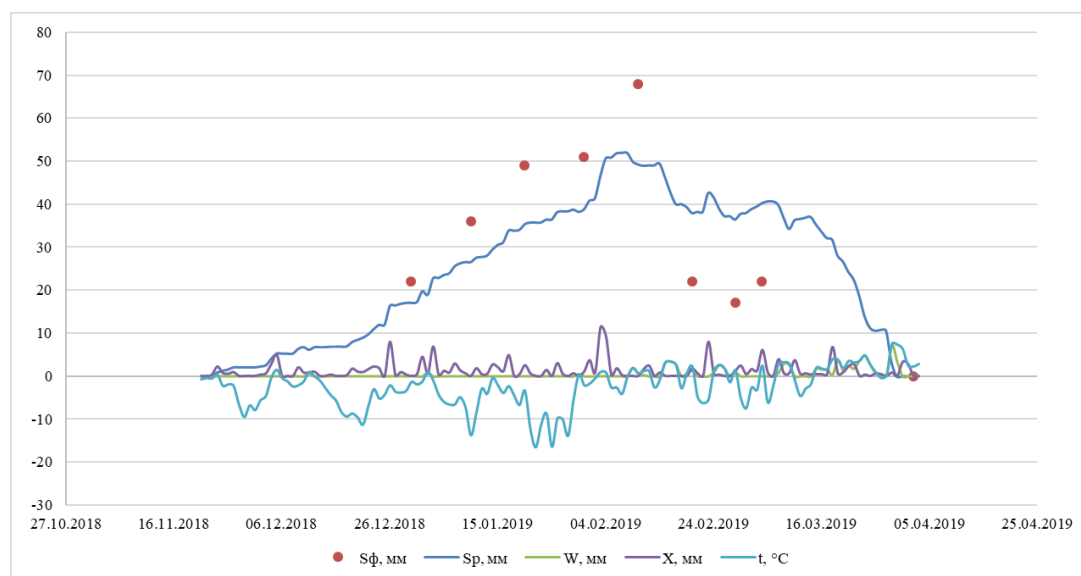


Рисунок 12 - Хронологический график фактических и расчетных запасов воды в снеге станции г. Старая Русса для холодного периода с 2018 по 2019 г.

Приложение 3 Графики параметризации расходов воды за холодный период на р. Ловать – п. Холм с 2008 по 2019 г и апробации модели формирования стока за 2018 и 2019 гг.

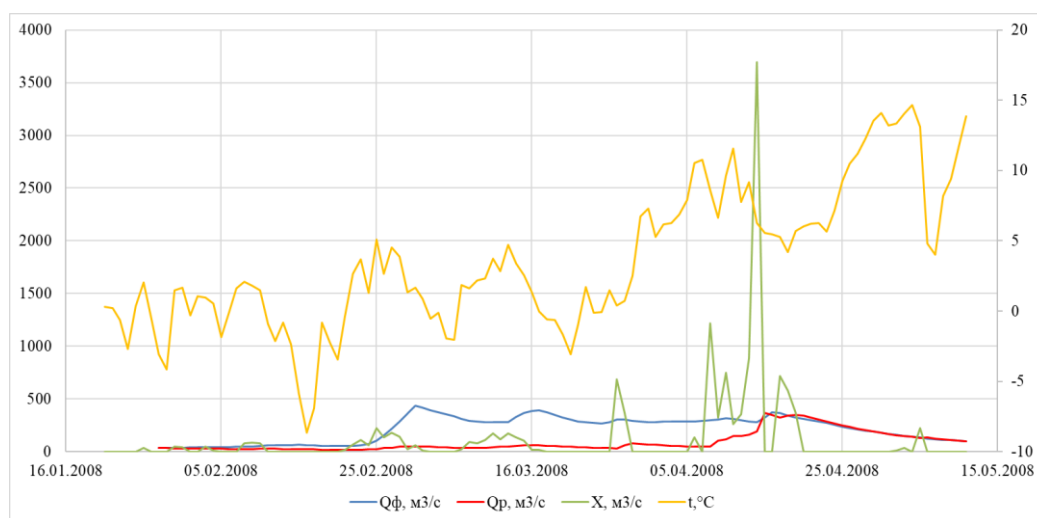


Рисунок 1 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2008 г., $k = 0.8033$, $\tau = 16$ сут., $S/\sigma = 1.49$

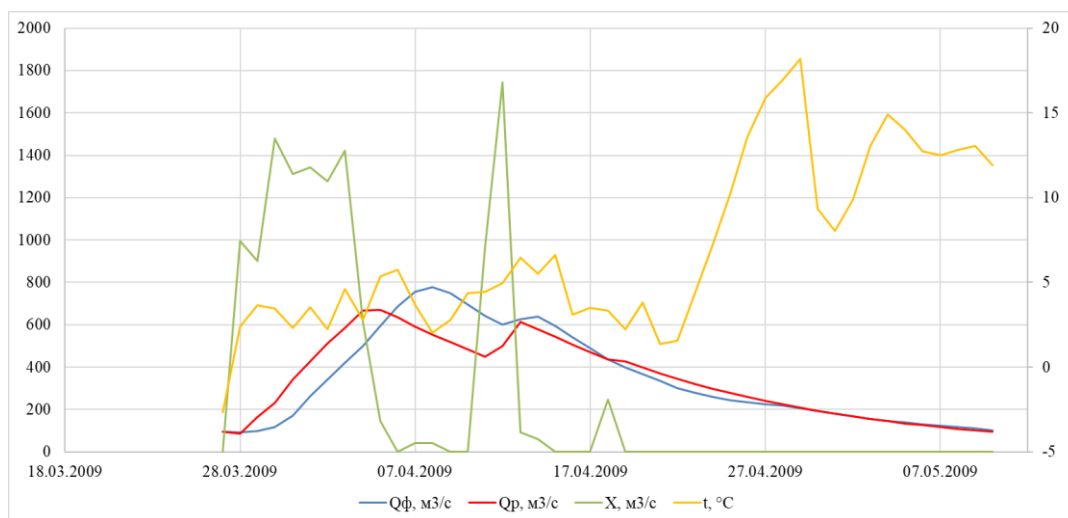


Рисунок 2 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2009 г., $k = 1.2198$, $\tau = 14$ сут., $S/\sigma = 0.45$

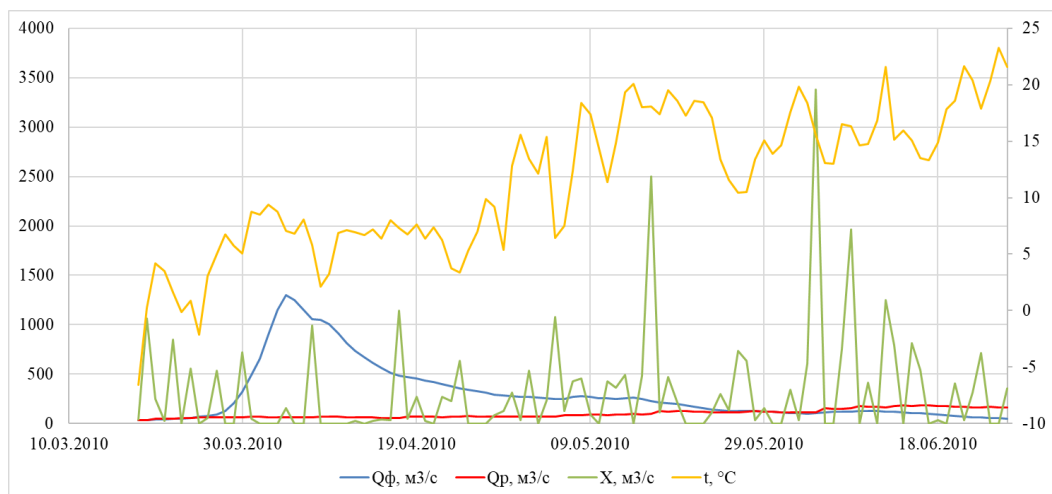


Рисунок 3 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2010 г., $k = 0.4625$, $\tau = 36$ сут., $S/\sigma = 1.28$

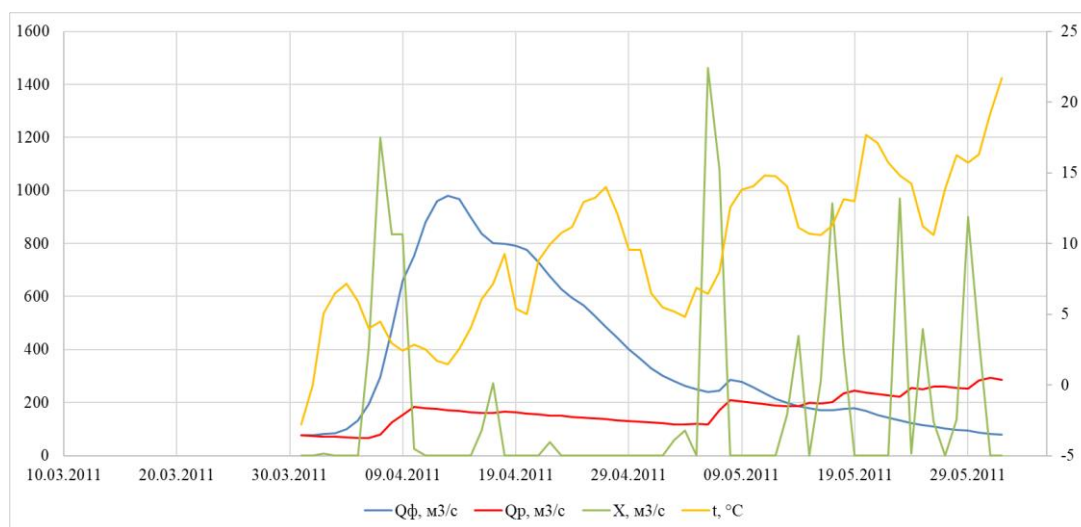


Рисунок 4 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2011 г., $k = 1.6695$, $\tau = 43$ сут., $S/\sigma = 1.29$

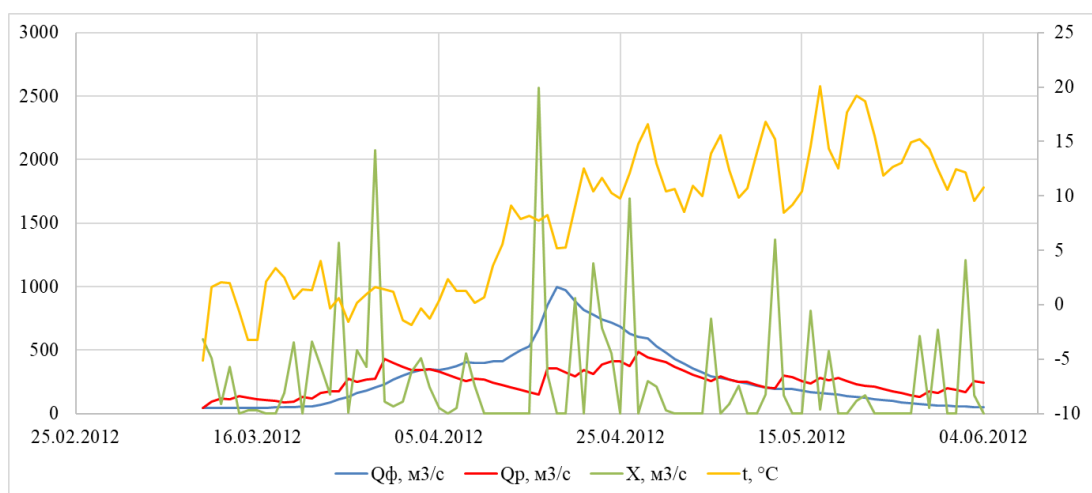


Рисунок 5 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2012 г., $k = 0.9505$, $\tau = 11$ сут., $S/\sigma = 1.82$

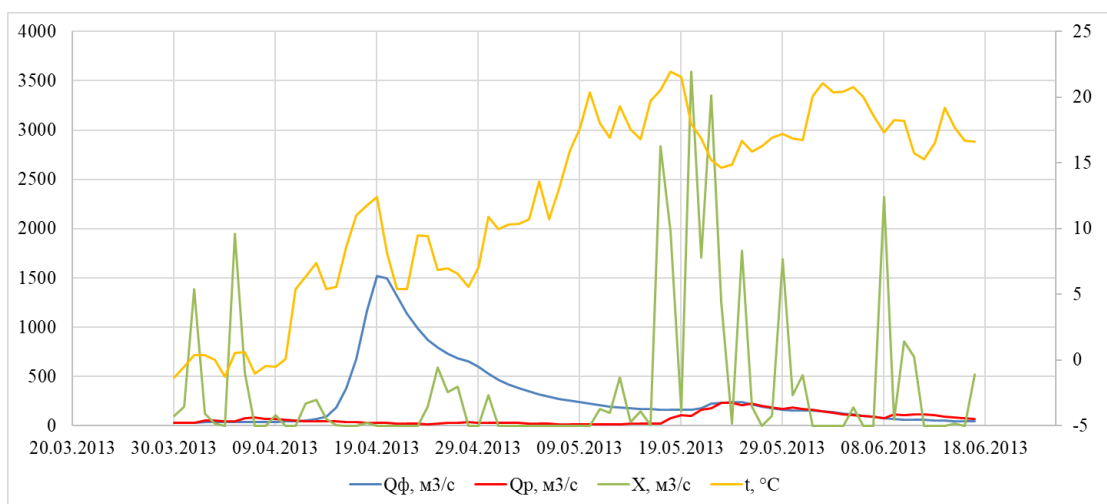


Рисунок 6 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2013 г., $k = 0.1990$, $\tau = 10$ сут., $S/\sigma = 1.25$

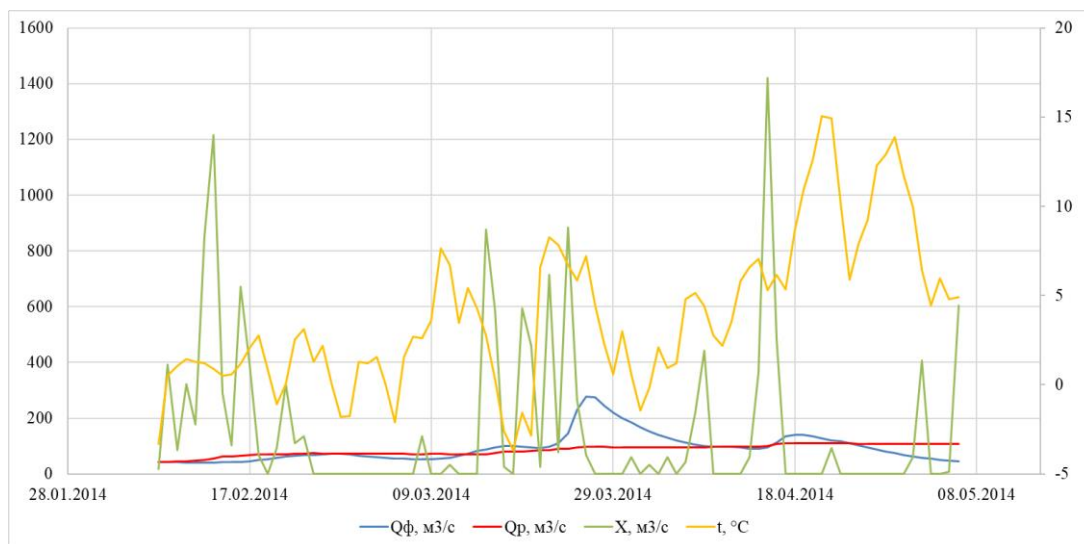


Рисунок 7 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2014 г., $k = 1.9758$, $\tau = 305$ сут., $S/\sigma = 0.90$

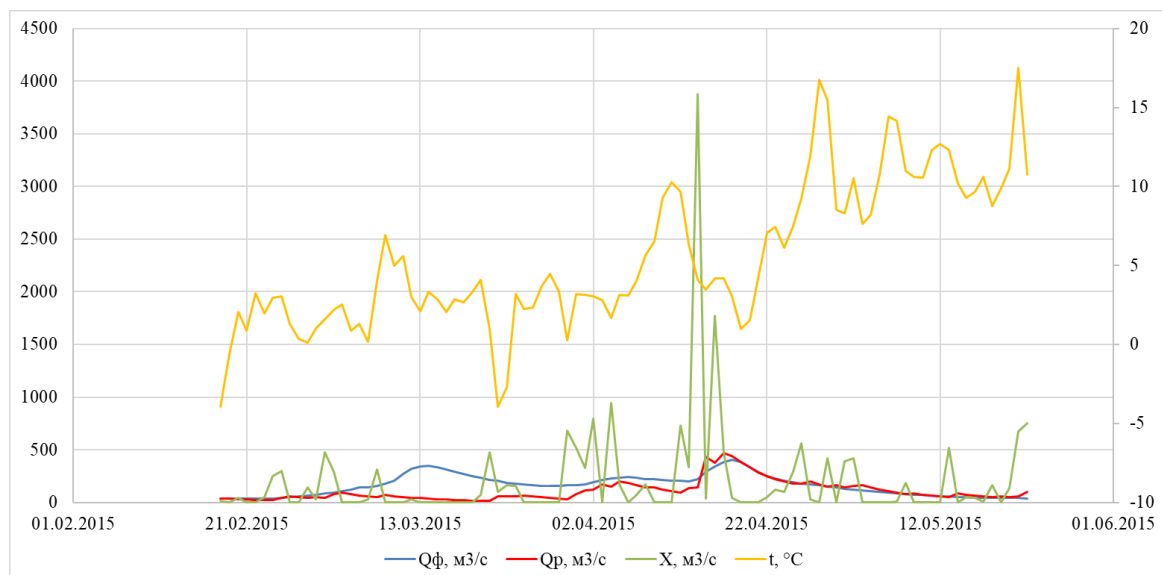


Рисунок 8 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2015 г., $k = 0.5877$, $\tau = 7$ сут., $S/\sigma = 1.12$

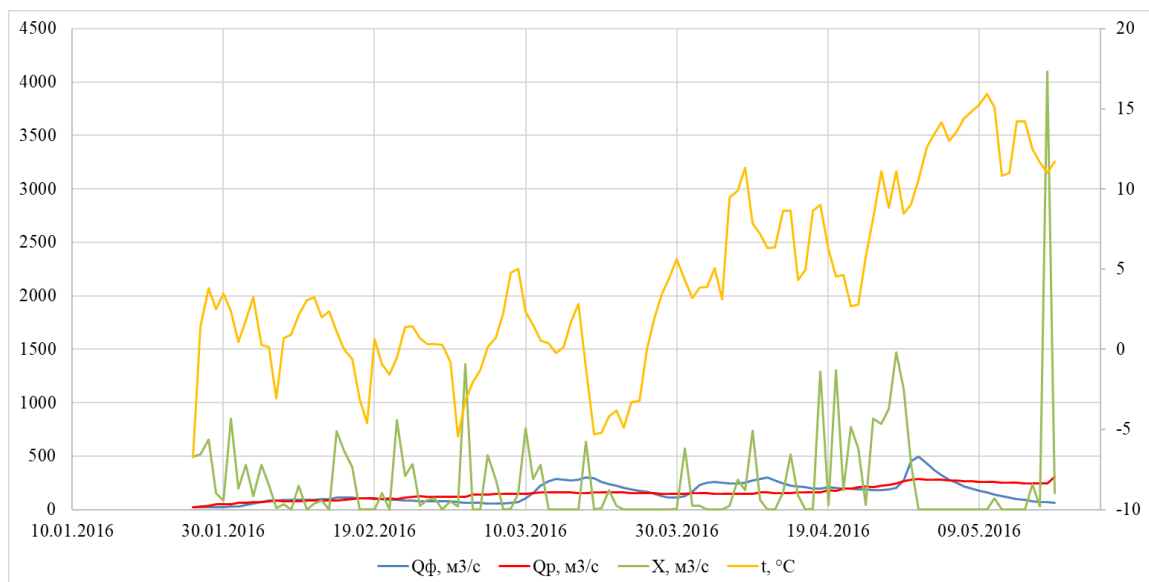


Рисунок 9 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2016 г., $k = 1.4398$, $\tau = 90$ сут., $S/\sigma = 0.84$

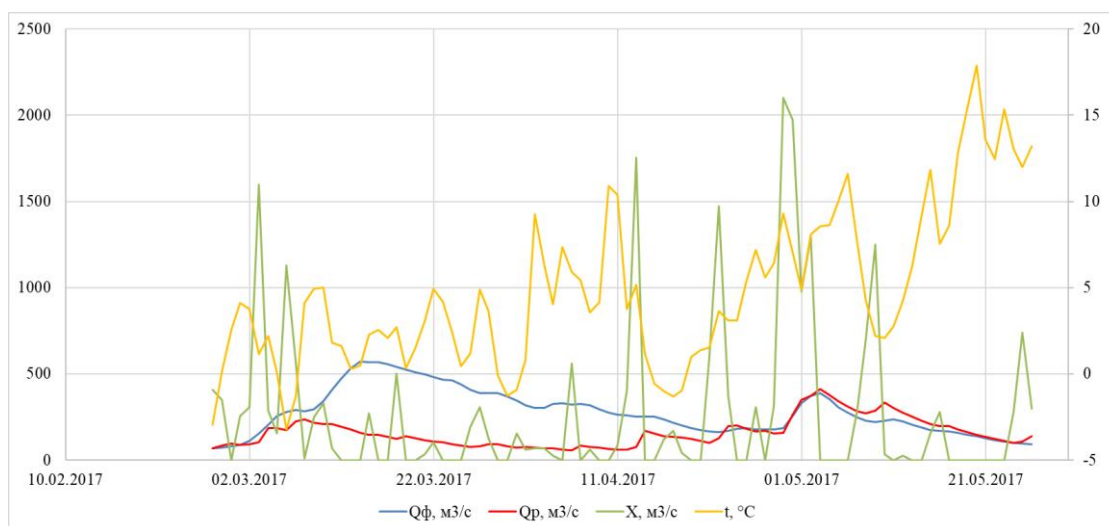


Рисунок 10 – График параметризации расходов воды на
р. Ловать – п. Холм за 2017 г., $k = 0.6244$, $\tau = 11$ сут., $S/\sigma = 1.52$

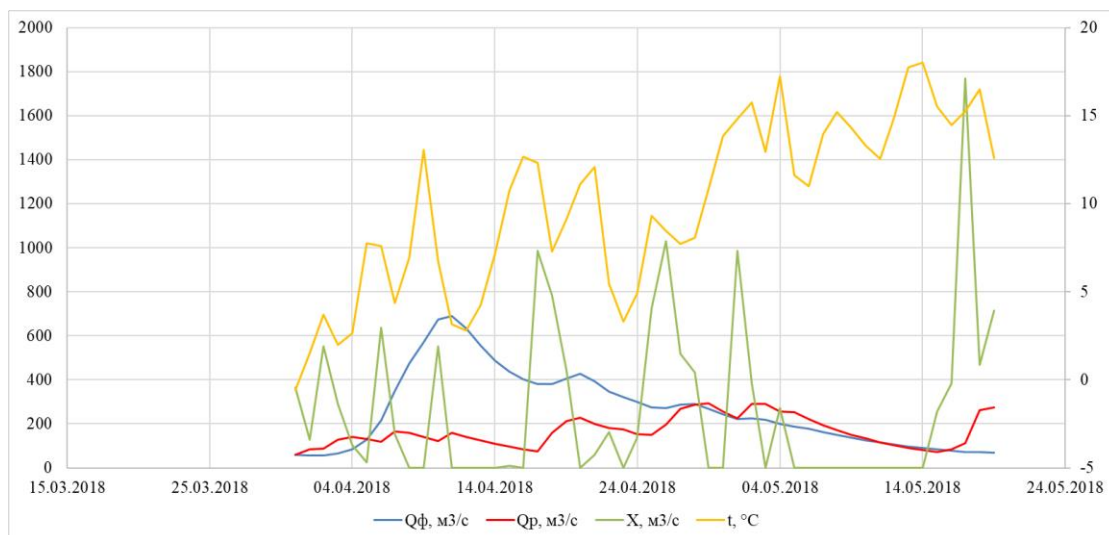


Рисунок 11 – График апробации модели формирования стока на
р. Ловать – п. Холм за 2018 г., $k = 0.7769$, $\tau = 8$ сут., $S/\sigma = 1.23$

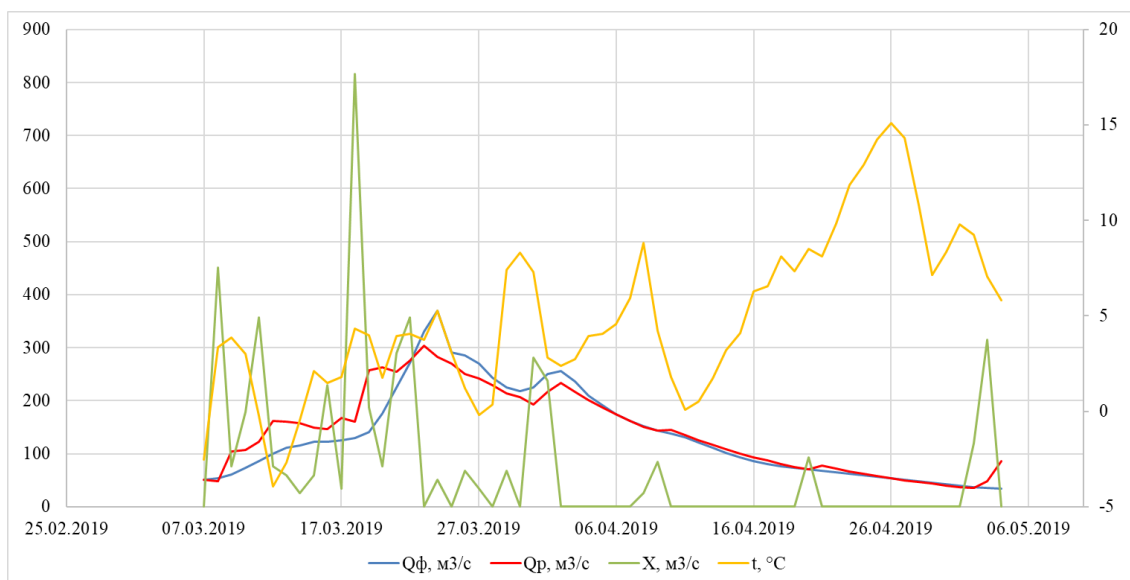


Рисунок 12 – График апробации модели формирования стока на
р. Ловать – п. Холм за 2019 г., $k = 1.8897$, $\tau = 14$ сут., $S/\sigma = 0.37$

Приложение 4 Графики параметризации уровней воды за холодный период на оз. Ильмень – пост. Коростынь с 2008 по 2019 г. и апробации модели водоема за 2018 и 2019 гг.

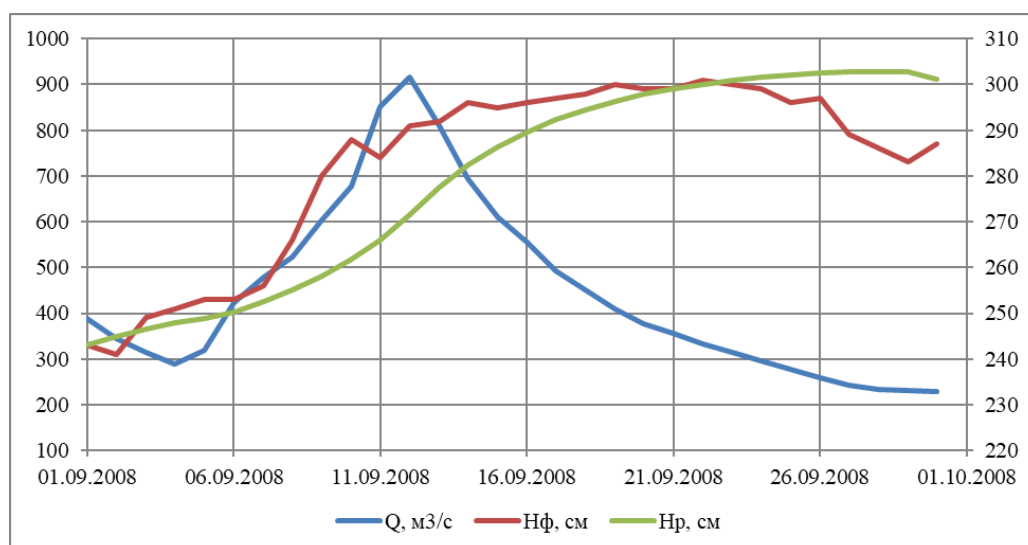


Рисунок 1 – График параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2008 г.

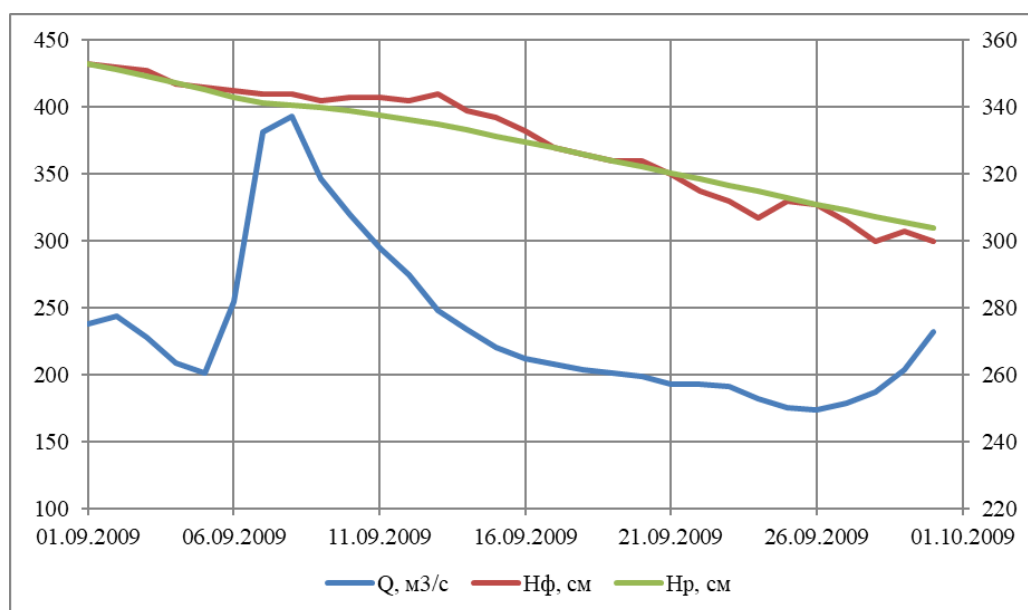


Рисунок 2 – График параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2009 г.

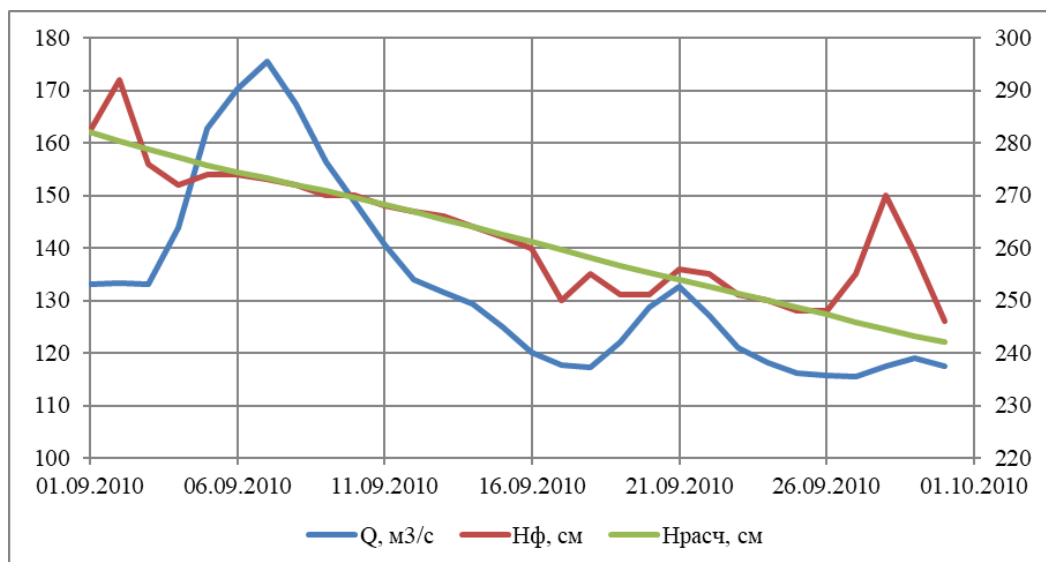


Рисунок 3 – График параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2010 г.

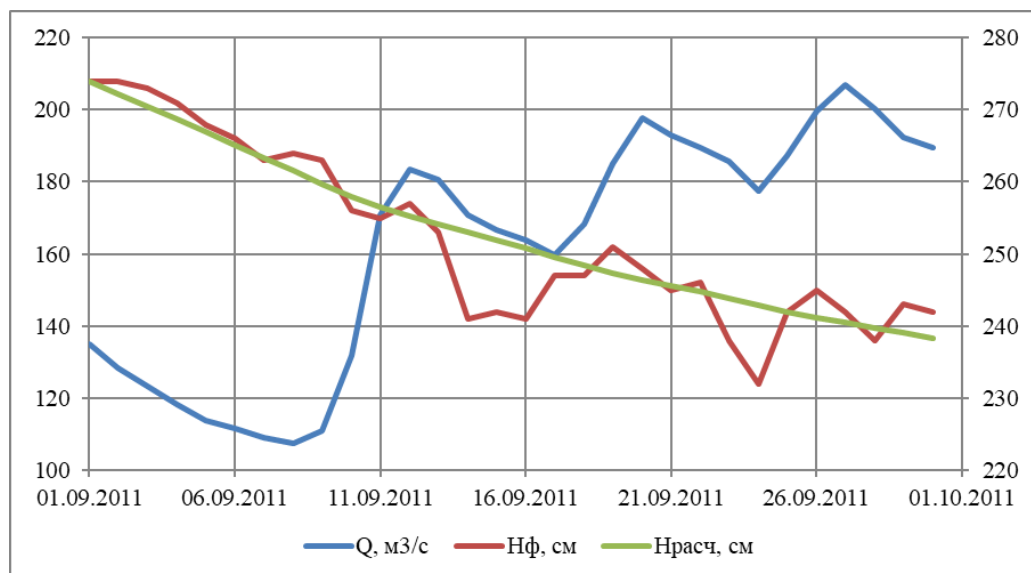


Рисунок 4 – График параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2011 г.

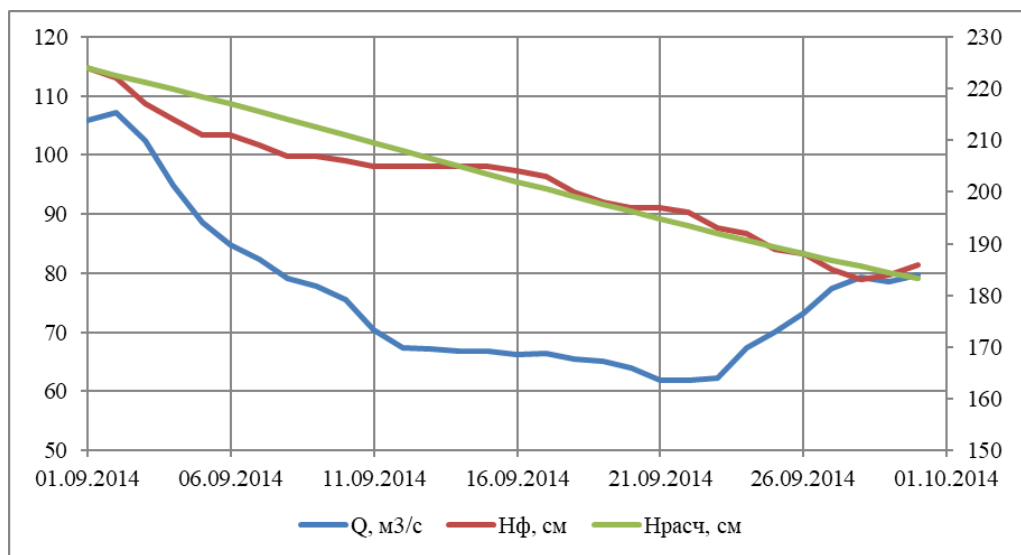


Рисунок 7 – График параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2014 г.

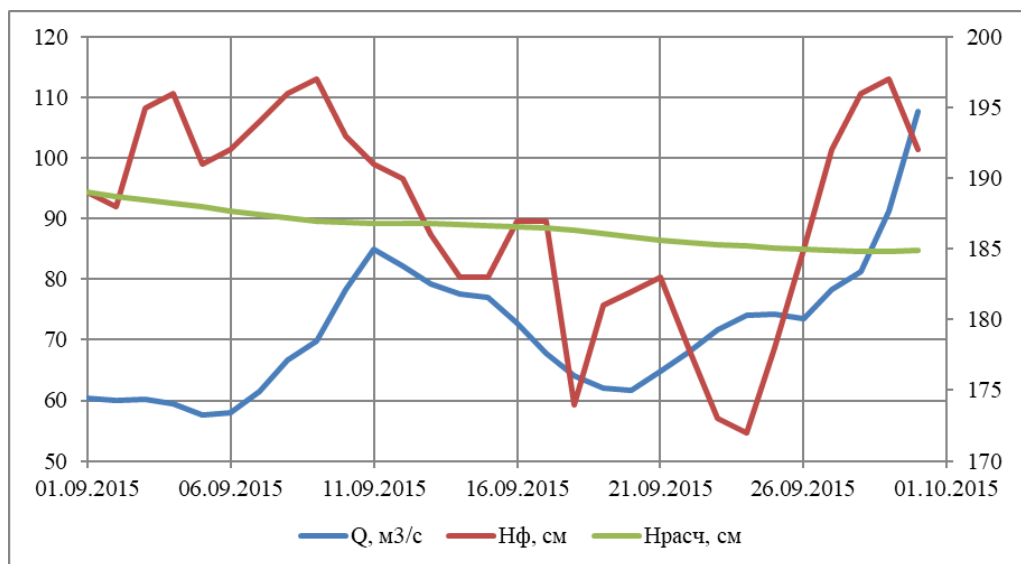


Рисунок 8 – График параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2015 г.

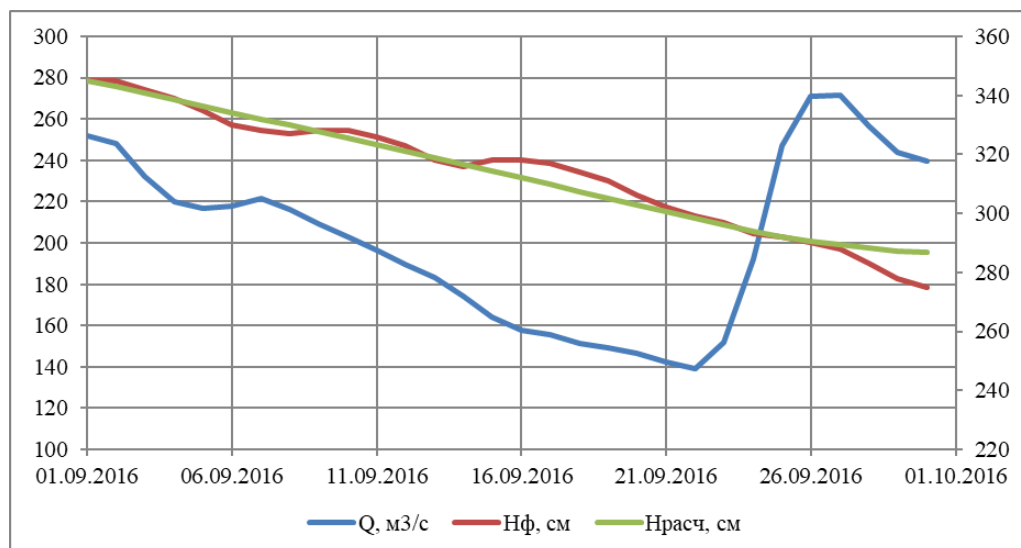


Рисунок 9 – График параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2016 г.

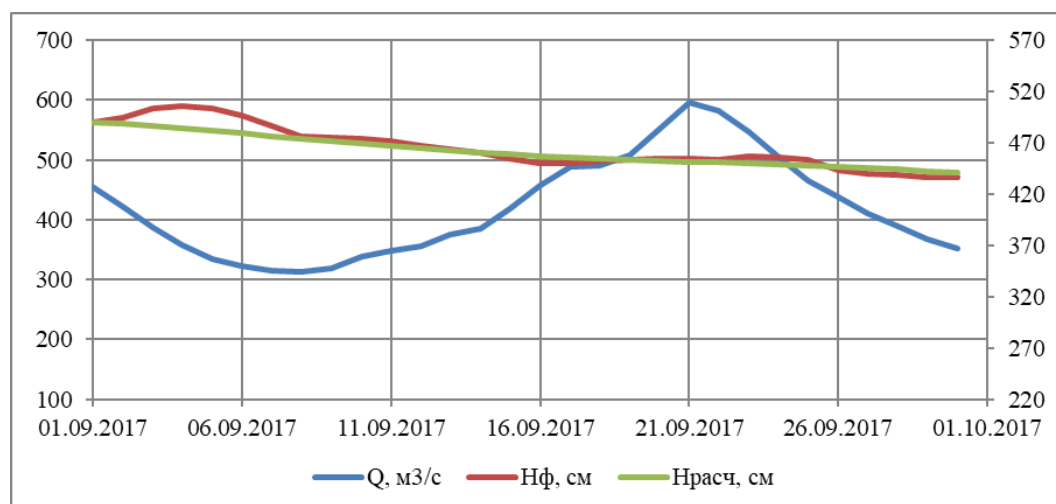


Рисунок 10 – График параметризации уровней воды на оз. Ильмень – пост. Коростынь за сентябрь 2017 г.

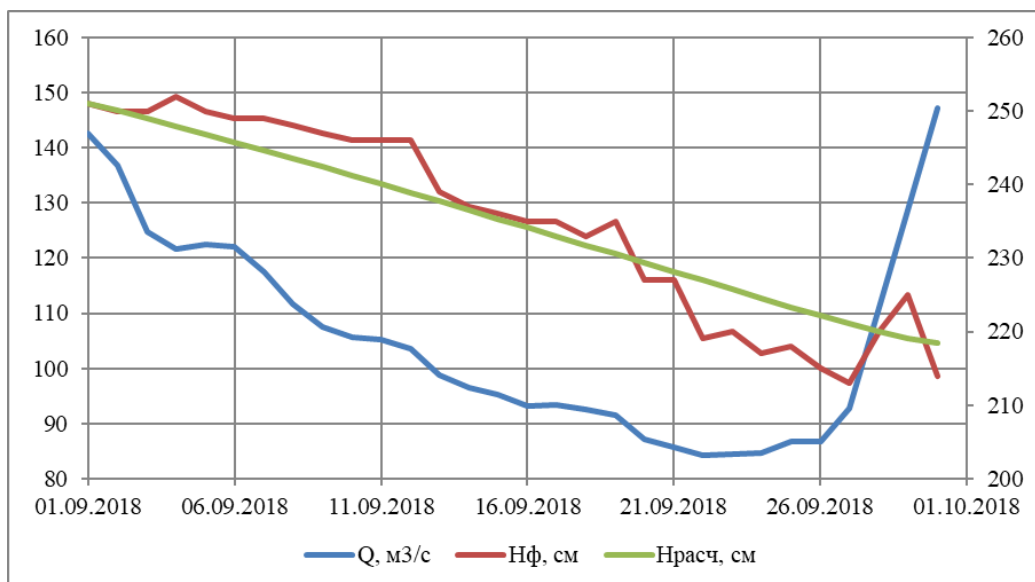


Рисунок 11 – График апробации модели водоема на оз. Ильмень – пост.
Коростынь за сентябрь 2018 г.

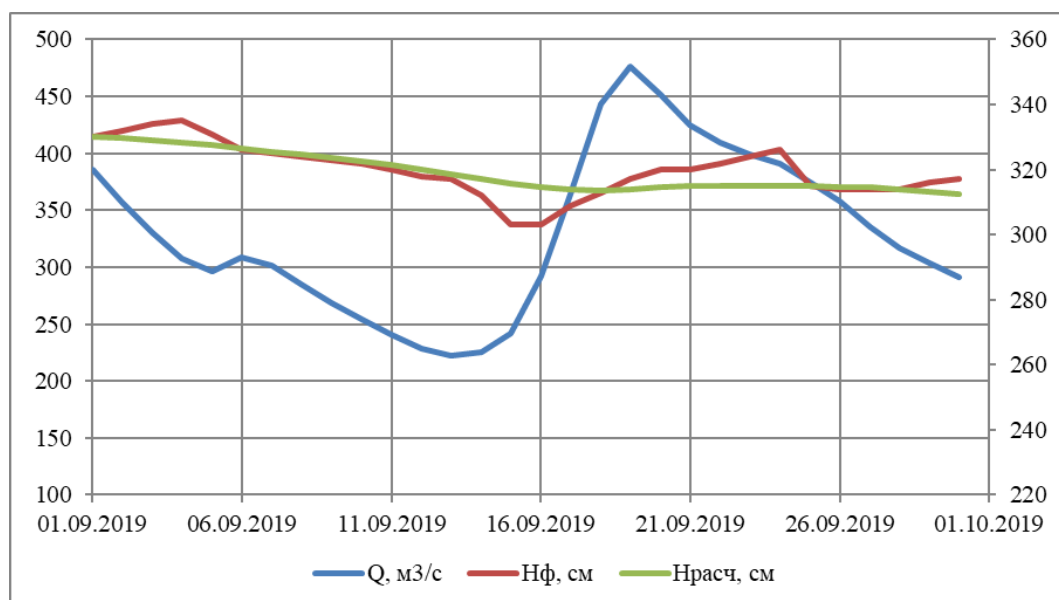


Рисунок 12 – График апробации модели водоема на оз. Ильмень – пост.
Коростынь за сентябрь 2019 г.

Приложение 5 Графики параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог с 2008 по 2022 г. и апробации модели руслового стока за 2020 – 2022 гг.

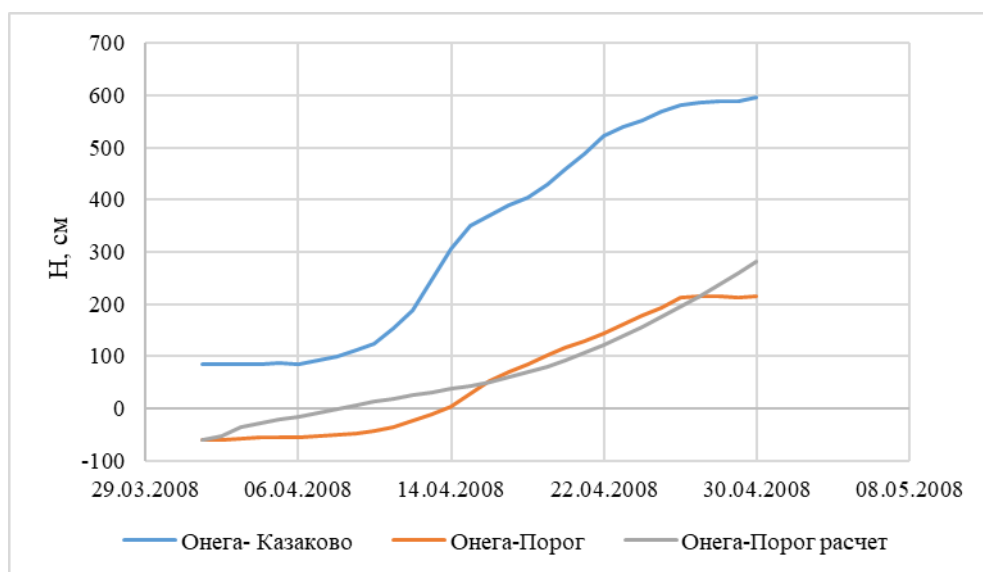


Рисунок 1 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2008 г., $a=11,2$, $q=-0,03$, $S/\sigma =2,11$

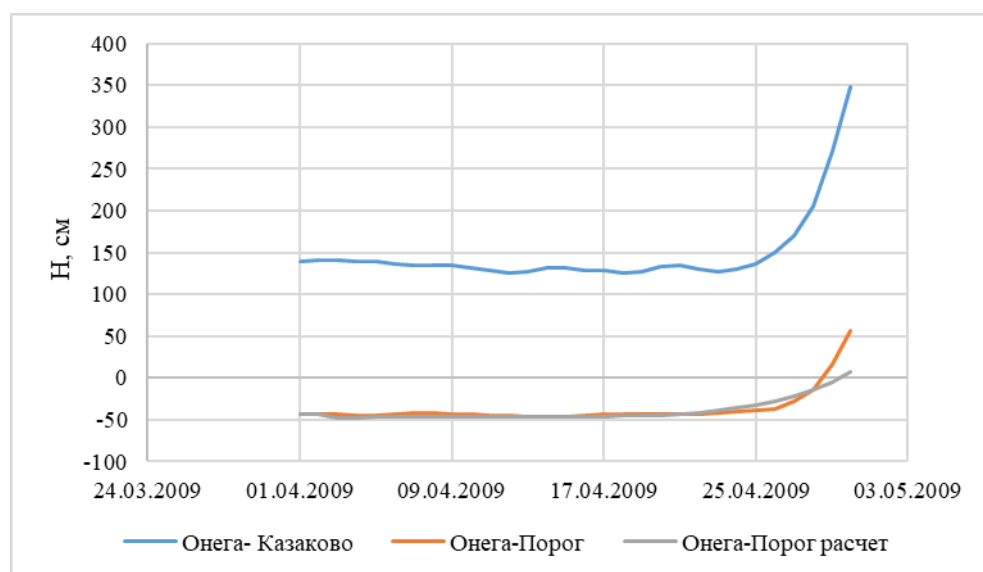


Рисунок 2 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2009 г., $a=-5,79$, $q=6,20$, $S/\sigma =0,77$

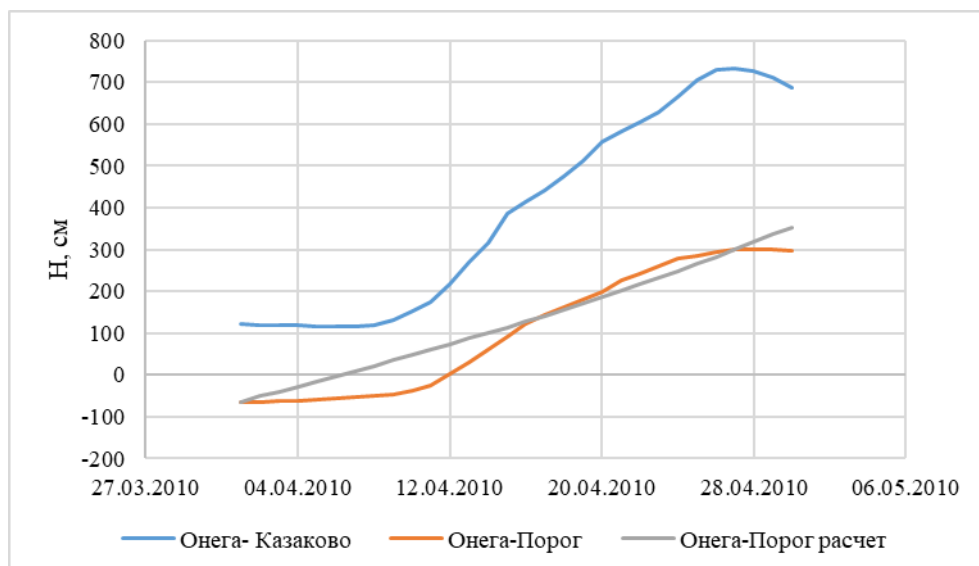


Рисунок 3 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2010 г., $a=-3,66$, $q=16,4$, $S/\sigma =2,66$

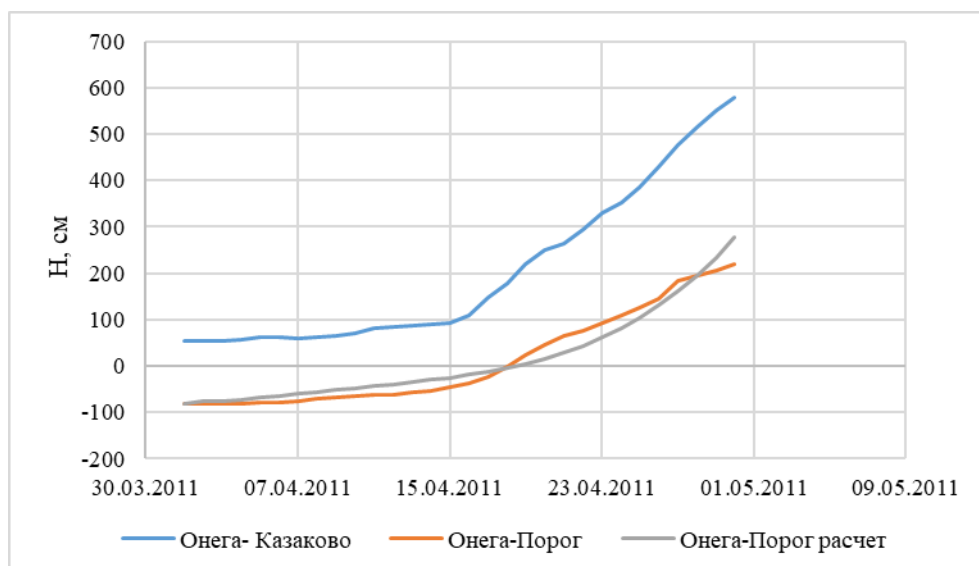


Рисунок 4 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2011 г., $a=-6,83$, $q=9,26$, $S/\sigma =1,60$

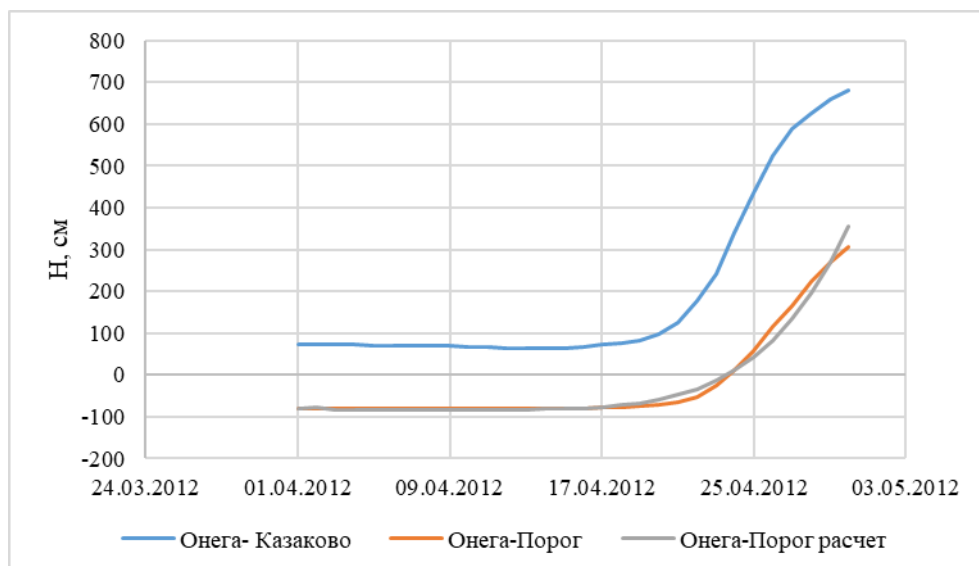


Рисунок 5 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2012 г., $a=-8,17$, $q=7,61$, $S/\sigma=0,97$

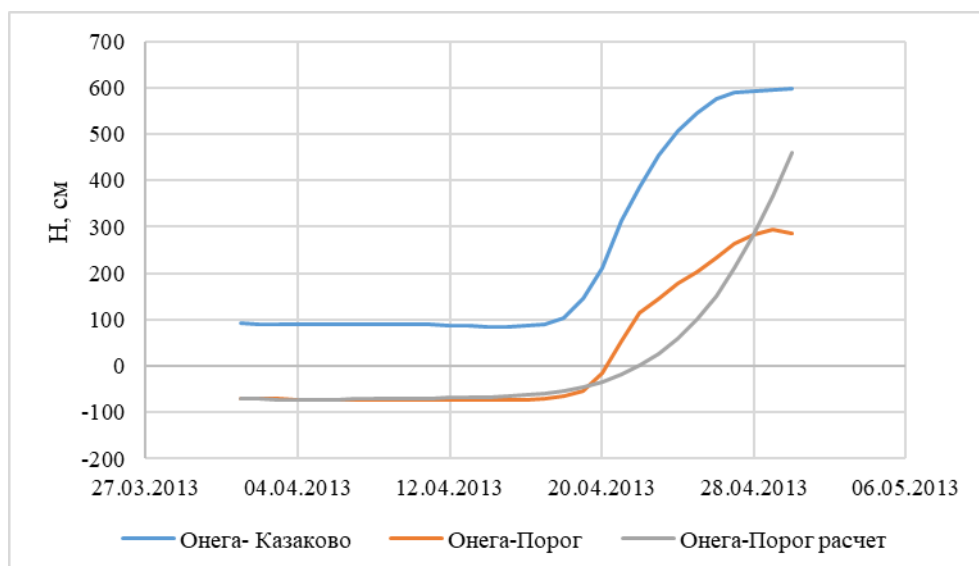


Рисунок 6 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2013 г., $a=-8,45$, $q=8,78$, $S/\sigma=3,75$

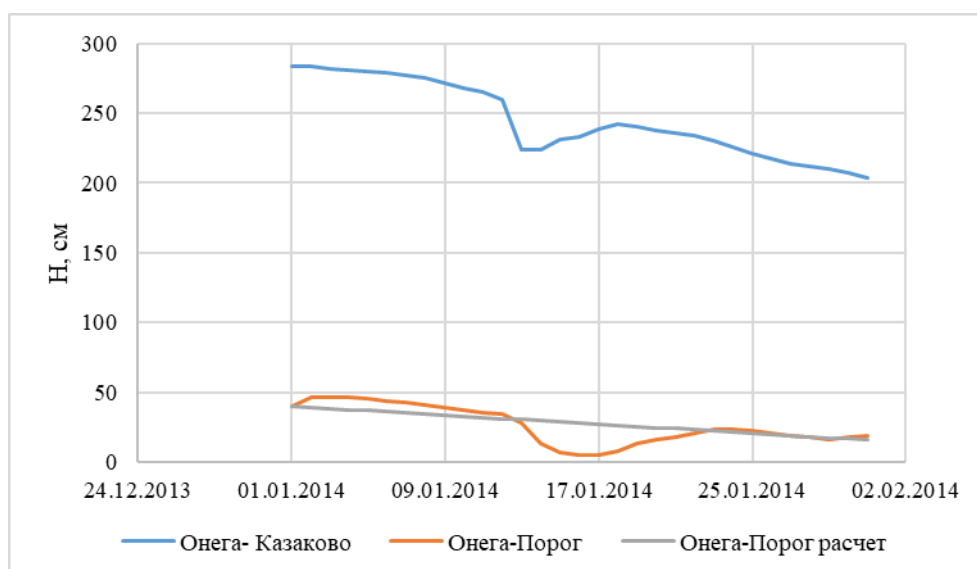


Рисунок 7 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2014 г., $a=-0,63$, $q=-0,029$, $S/\sigma=0,59$

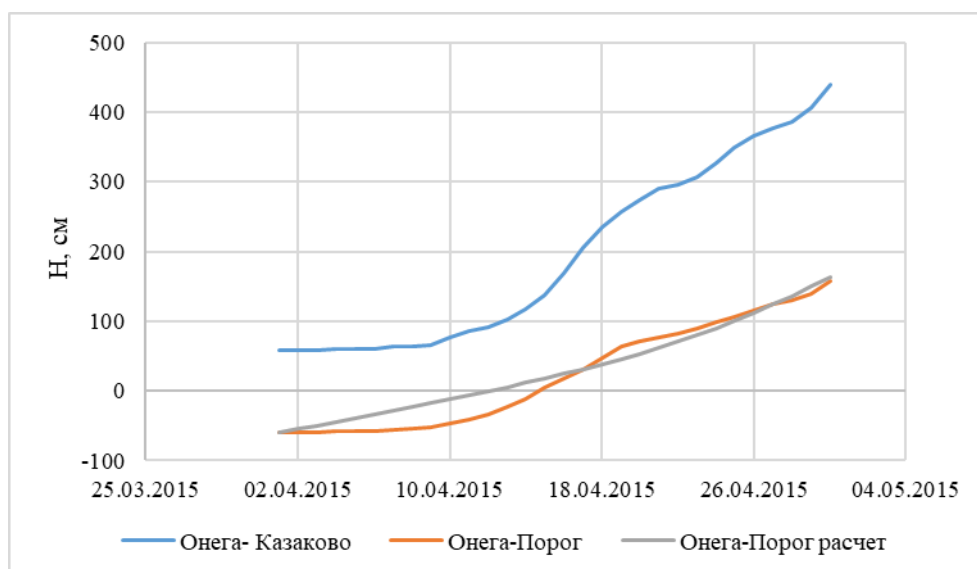


Рисунок 8 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2015 г., $a=-4,78$, $q=8,57$, $S/\sigma=1,50$

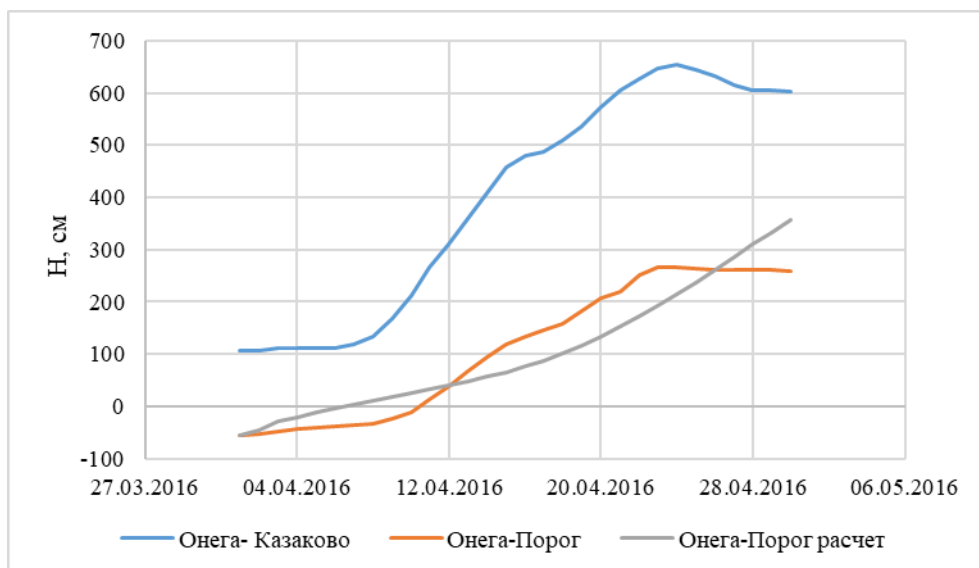


Рисунок 9 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2016 г., $a=11,1$, $q=-0,03$, $S/\sigma =2,88$

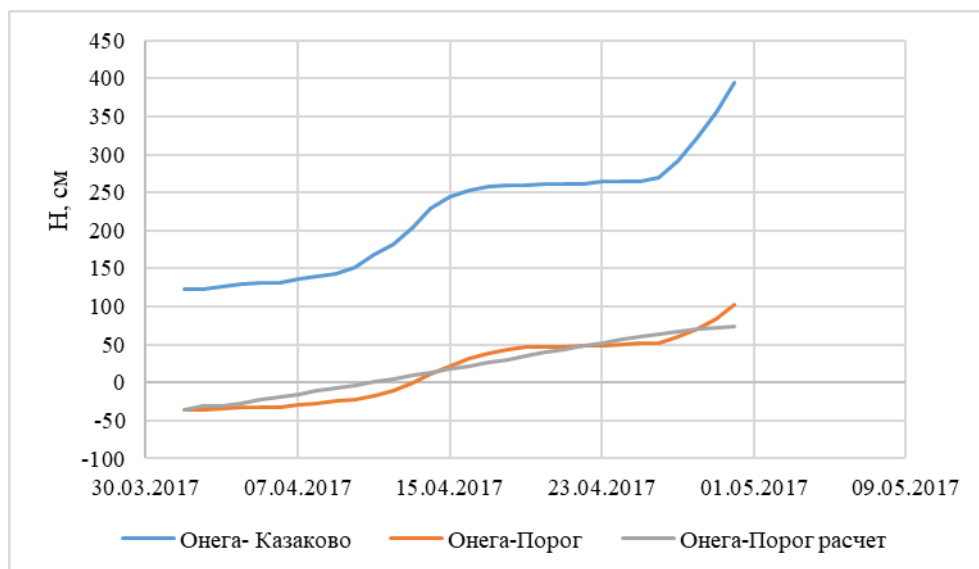


Рисунок 10 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2017 г., $a=-5,15$, $q=8,55$, $S/\sigma =0,86$

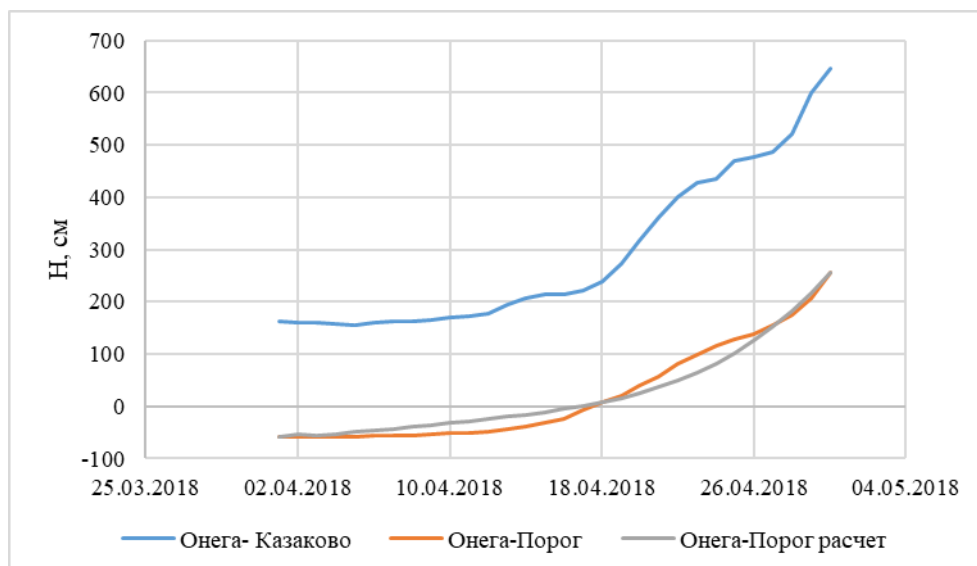


Рисунок 11 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2018 г., $a=-6,11$, $q=11,2$, $S/\sigma=1,10$

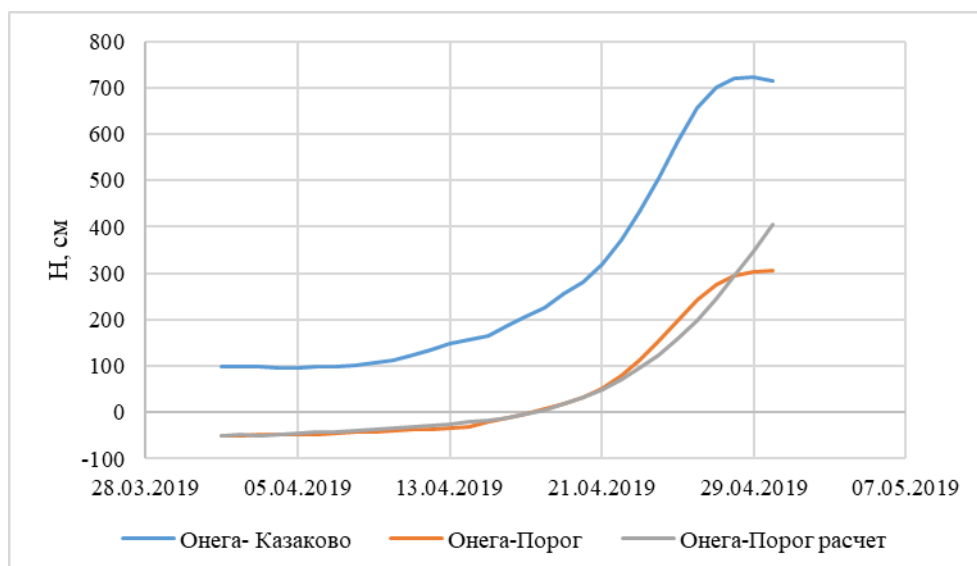


Рисунок 12 - График параметризации уровней воды на р. Онега – с. Порог за апрель 2019 г., $a=-8,38$, $q=9,67$, $S/\sigma=1,53$

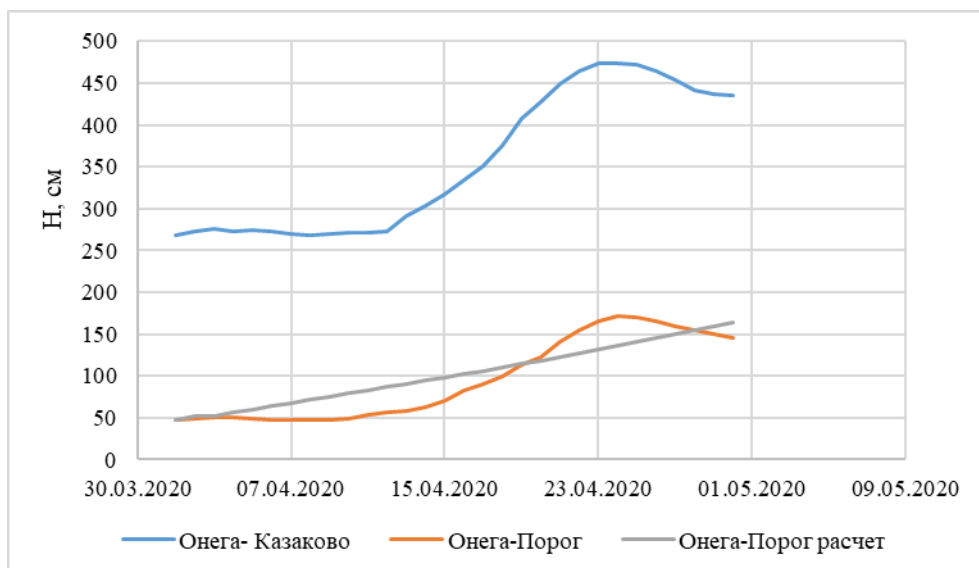


Рисунок 13 - График апробации модели руслового стока на р. Онега – с. Порог за апрель 2020 г., $a=-3,49$, $q=7,95$, $S/\sigma =1,39$

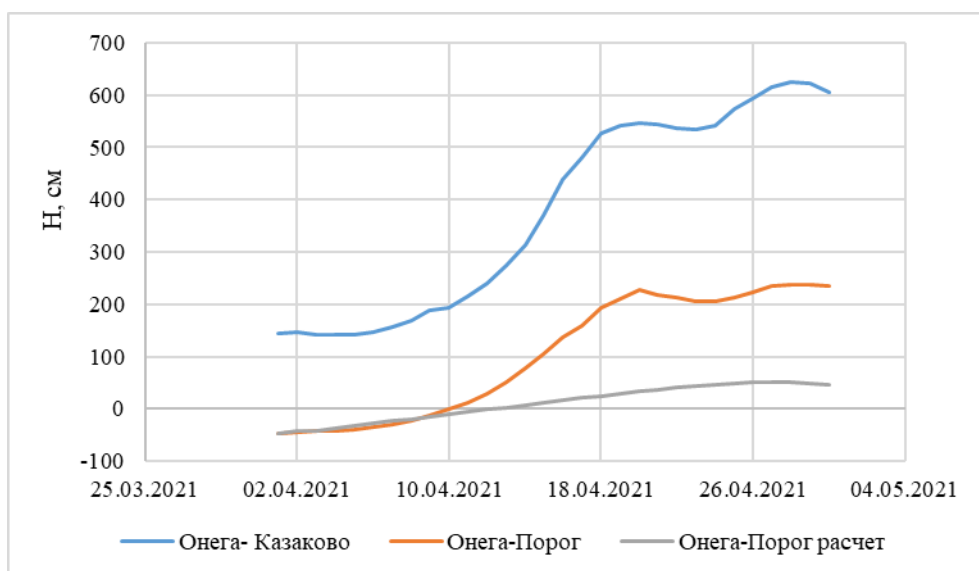


Рисунок 14 - График апробации модели руслового стока на р. Онега – с. Порог за апрель 2021 г., $a=-3,49$, $q=7,95$, $S/\sigma =6,71$

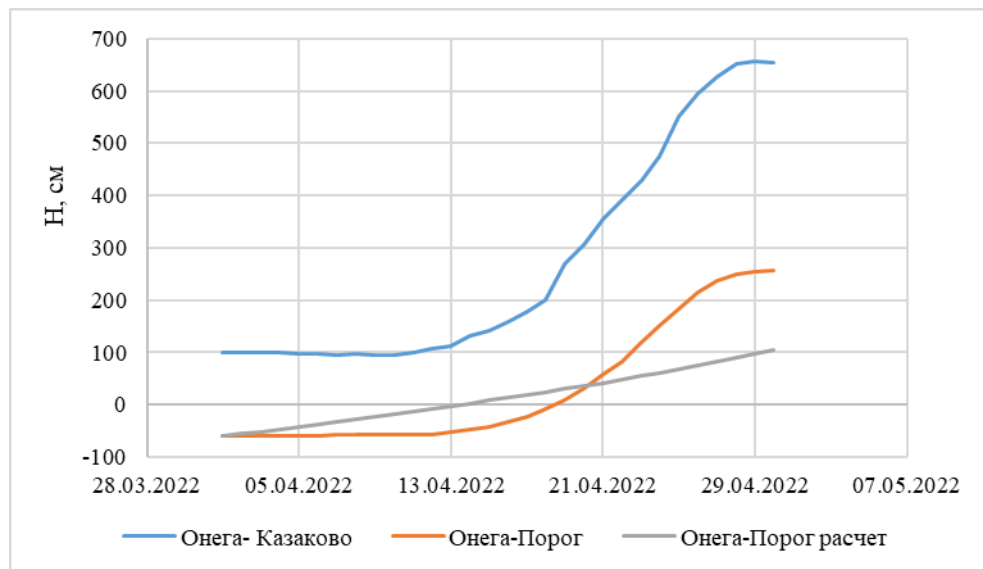


Рисунок 15 - График апробации модели руслового стока на р. Онега – с. Порог за апрель 2022 г., $a=-3,49$, $q=7,95$, $S/\sigma=4,82$