



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему **Разработка методики прогноза
стока в бассейне реки Тосна**

Исполнитель Ванюкова Дарья Дмитриевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Викторова Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«26» июля 2025г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Физико-географическое описание.....	6
1.1 Местоположение	6
1.2 Гидрогеологическая особенность района	6
1.3 Почвенный покров	9
1.4 Растительный покров	10
1.5 Особенности климата.....	12
1.6 Гидрологическая изученность	13
1.7 Экологическое состояние реки Тосна	15
2. Обзор существующих методик прогноза заторных (зажорных) уровней воды.....	18
2.1 Эмпирический метод прогноза зажорных и заторных уровней воды	18
2.2 Прогноз заторно-зажорных уровней воды на основе прогноза максимального расхода во время ледохода	20
2.3 Прогноза максимального заторного уровня на данных ледовой авиаразведки	21
2.4 Прогноз максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины	23
3. Исходные данные	26
1.1 Объект исследования	26
3.2 Сбор и обработка исходных данных	28
4. Прогноз стока весеннего половодья.....	45
4.1 Прогноз стока весеннего половодья физико-статистическим метод	45
4.2 Кластерный анализ	51
5. Прогноз слоя стока	67

6. Прогноз максимальных расходов воды	73
7. Прогноз максимальных уровней воды	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	92
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчет прогноза слоя стока весеннего половодья физико- статистическим методом	96
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Графики зависимостей максимальных уровней воды от максимальных расходов за период весеннего половодья	99

ВВЕДЕНИЕ

Причиной возникновения половодья являются ледоход и весеннее половодье, вследствие таяния снега и его стока в русло реки. Гидрологический режим рек процесс индивидуальный для каждой реки и изменчивый, зависит от ряда метеорологических явлений. В метеорологии имеется ряд универсальных закономерностей, зависящих от масштабов, в гидрологии же для каждой реки закономерности индивидуальны. Формирование весеннего половодья имеет изменчивый характер для каждого года за счет различных количественных показателей метеорологических явлений таких, как осадки и снеготопасы, насыщенности почвы водой и других. Одним из важных показателей в гидрологии является высокий уровень воды в весеннее половодье, который может формироваться за счет высокого увлажнения почвы осенью, большим запасом воды в снежном покрове, большим количеством осадков весной.

Выход воды на пойму и надпойменную террасу нередко связаны с заторными явлениями.

Актуальность выбранной тематики объясняется необходимостью предотвращения последствий от опасной и неблагоприятной отметки уровня воды в реке, которые могут привести к наводнению. Данное явление несет последствия для сельского хозяйства, промышленности и экономики. Для предотвращения наводнений составляется прогноз основных характеристик весеннего стока, таких как максимальный расход и уровень воды, объем стока.

Магистерская диссертация посвящена разработке методики прогноза стока в бассейне реки Тосна. Так как г. Тосно, по территории которого протекает река, практически ежегодно подвержен затоплению, данная методика имеет практическую значимость.

В преддверии весеннего половодья гидрологические прогнозы имеют высокую значимость. Прогнозы начинают давать в период ледохода и

корректируются по мере изменения гидрометеорологических элементов. Правильный прогноз позволяет принять меры для предотвращения чрезвычайных ситуаций и на 30 – 60% снизить ущерб от наводнений.

Целью работы является выявление основных факторов, влияющих на сток весеннего половодья р. Тосна, определение их влияние на регулирование речного потока и на основе этой информации разработка метода прогноза, который позволял бы прогнозировать максимальный уровень воды в реке в период весеннего половодья. Весеннее половодье на р. Тосна проходит в основном в период с марта по май.

Для достижения цели были определены следующие задачи:

- исследовать физико-географические особенности исследуемой территории;
- провести анализ существующих методик заторных (зажорных) уровней воды;
- собрать и обработать данные необходимые для дальнейших расчетов;
- выпустить методику прогноза слоя стока весеннего половодья на основе физико-статистического метода;
- разделить данные на группы с целью выполнения дискриминантного анализа;
- выполнить прогноз слое стока весеннего половодья;
- создать методику прогноза максимальных уровней воды в период весеннего половодья;
- создать методику прогноза максимальных уровней воды;
- оценить эффективность методик методом ГМЦ;
- выполнить поверочный прогноз по созданной методике и оценить его оправдываемость.

1. Физико-географическое описание

1.1 Местоположение

Рассматриваемый объект – р. Тосна, протекает по юго-восточной части Ленинградской области по территории Тосненского района. Ленинградская область располагается на северо-западе европейской части страны, входит в состав Северо-Западного федерального округа (рисунок 1.1) [1].

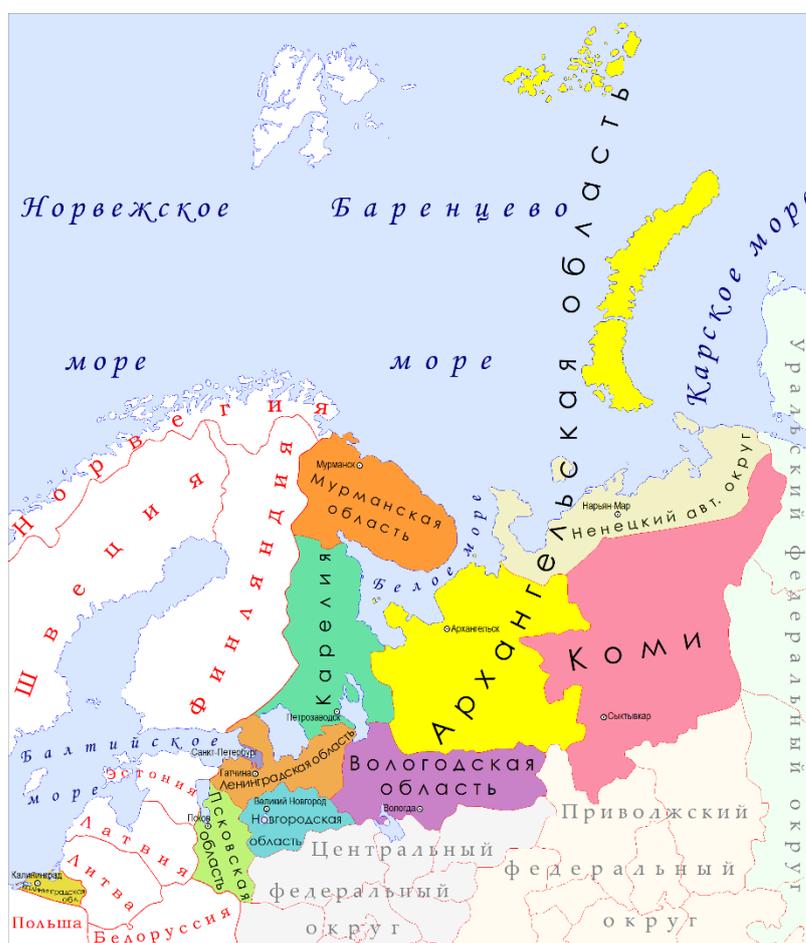


Рисунок 1.1 – Состав Северо-Западного федерального округа

1.2 Гидрогеологические особенности района

Ленинградская область обладает сложным гидрогеологическим строением, отражающим взаимодействие литолого-геоморфологических и

гидрогеохимических условий. Регион располагается в пределах Балтийского кристаллического щита, границы которого осложнены осадочно-пирогенетическими формациями разного возраста. В пределах Ленинградского артезианского бассейна выделяются два главных комплекса водоносных пластов:

1. Четвертичный комплекс:

– включает поверхностные грунтовые воды и неглубоко залегающие горизонты, состоящие из рыхлых четвертичных отложений (моренных суглинков, флювиогляциальных песков, аллювиальных отложений);

– глубина залегания колеблется от нескольких метров до десятков метров;

– воды относятся к пресноводным гидрокарбонатно-кальциевому типу с минерализацией менее 1 грамма на литр.

2. Мезозойские комплексы:

– расположены глубже, состоят из юрских и триасовых глинистых, карбонатных и песчаных слоев.

– эти слои формируют глубоко залеженные подземные резервуары и содержат преимущественно солоновато-просветочные и соленые воды.

Особенностью района является сочетание разнотипных водоносных горизонтов и сложная структура подземных вод. Поверхностные грунтовые воды находятся близко к поверхности, заполняя верхние горизонты четвертичных отложений. Вода движется горизонтально, направляясь в сторону ближайших водоемов и рек.

Наиболее распространённые горные породы – четверичные отложения, покрывающие кристаллический фундамент и плейстоценовую морену. Пористая структура отложений обеспечивает фильтрацию атмосферных осадков и питание грунтовых вод;

Межморенные водоносные горизонты проявляются локально, преимущественно в районах глубоких трещин и разрывов, проникая сквозь древние карстовые полости и каналы.

Пониженные участки местности (долины рек, старицы, болота) характеризуются постоянным повышенным стоянием уровня грунтовых вод, способствуя формированию застойных болотных вод и развитию торфяных массивов.

Важным аспектом гидрогеологии района является присутствие проявлений карста и солифлюкции. Карстовые пустоты развиваются в зонах распространения трещиноватых известняков и мергелей, создавая потенциальные риски просадки грунта и загрязнения подземных вод. Солифлюкция проявляется в виде медленного сползания тонкодисперсных грунтов, увлажнённых водой, что характерно для склонов овражно-балочной сети.

Основной проблемой района является загрязнение грунтовых вод техногенными отходами, сельскохозяйственными удобрениями и бытовыми стоками. Особенно уязвимы районы застройки, прилегающие к рекам и ручьям, где фильтрация загрязнителей ускоряется. Истощение запасов подземных вод связано с активной эксплуатацией колодцев и скважин, отсутствием эффективного регулирования забора воды и увеличением водоотведения [1, 2, 3].

Геологическая карта окрестностей Санкт-Петербурга представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 — Геологическая карта окрестностей Санкт-Петербурга

1.3 Почвенный покров

Ленинградская область преимущественно покрыта кислыми подзолистыми почвами, оптимально подходящими для развития лесной отрасли. Значительные площади занимают заболоченные участки с подзолисто-глеевыми и торфянисто-подзолисто-глеевыми грунтами, которые способны обеспечить высокую урожайность при условии специальной агротехнической обработки. Некоторые районы сложены песчаными отложениями и суглинистыми слоями с включением крупных камней. Отдельные зоны характеризуются наличием дерново-карбонатных земель, богатых минералами и идеально пригодных для сельскохозяйственного производства. Эти земли расположены в пределах Ордовикского плато, южнее Финского залива, вдоль реки Невы и побережья Ладожского озера. Они отличаются высоким уровнем плодородия. Низменные местности представлены глинистыми, песчано-суглинистыми землями с выраженными признаками сильного подзолообразования.

На территории Тосненского района, а также Волховского и Киришского почва часто переувлажнённая, что является возможностью для внедрения новых технологий в области гидротехники и агромелиорации. Такие мероприятия позволяют увеличивать плодородность почвы, урожайность, а также уменьшить риск подтоплений [1].

Карта почв Ленинградской области приведена на рисунке 1.3.

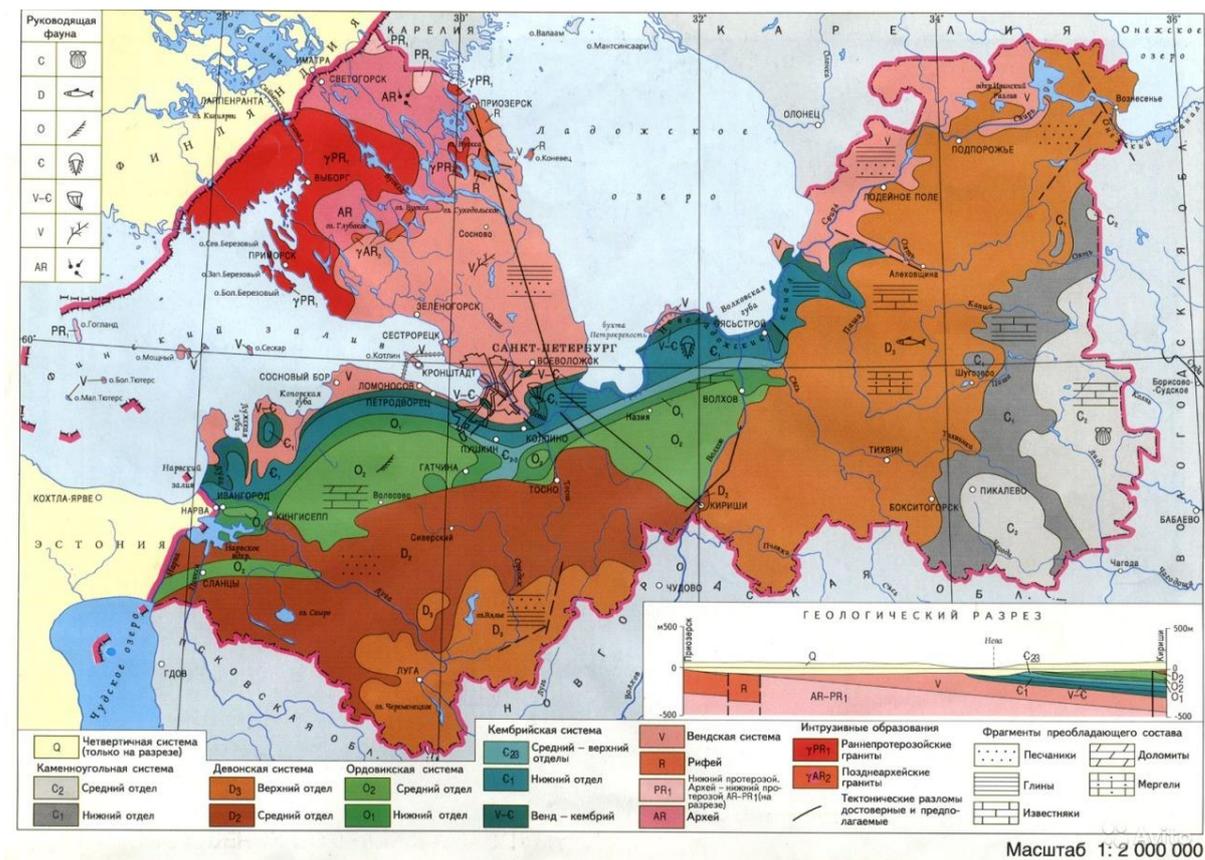


Рисунок 1.3 — Карта почв Ленинградской области

1.4 Растительный покров

Растительность Ленинградской области представлена различными видами лесов, болот и лугов, что объясняется особенностями климата и географического расположения региона.

Основная часть территории занята северными и южными таежными лесами, которые состоят преимущественно из сосны обыкновенной, ели

сибирской и березы повислой. Среди древесных видов также встречается дуб черешчатый, липа сердцелистная и ясень высокий.

Около трети территории составляют различные виды болот, такие как верховые, переходные и низинные. Верховые болота покрыты клюквенником, багульником и пушицей. Низинные болота характеризуются ивами, камышом и рогозом широколистным.

Вокруг поселений и сельскохозяйственных угодий распространены сенокосы и пастбища, засаженные такими видами трав, как тимофеевка луговая, клевер белый и мятлик луговой.

Реки и озера региона богаты водорослями и высшей водной флорой, такими как ряска малая, кубышка жёлтая и стрелолист обыкновенный.

Река Тосна протекает по живописным местам, омывая разнообразные экосистемы, характерные для юго-запада Ленинградской области.

Прибрежная полоса покрыта густой зеленью кустарников и деревьев, таких как ива белая, тополь чёрный и ольха чёрная. Кустарники представлены орешником, ракитой и смородиной черной.

Мелководные острова и каменистые пляжи служат убежищем для редких видов растений, таких как лютик едкий, таволга вязолистная и белокопытник лесной.

Граница лесного массива и открытого пространства привлекает редкие виды растений, например, папоротник мужской, чистотел большой и борец высокий.

Вдоль реки встречаются охранные объекты, такие как места произрастания венериного башмачка настоящего, лотоса восточного и дремлика болотного.

1.5 Особенности климата

Климатические условия области определяются мягкой зимой и теплым летом, характерными для умеренного климата с переходом от океанического влияния к континентальному.

Морские, континентальные и арктические воздушные массы часто сменяются, что делает погоду непостоянной. Морские воздушные массы, приходящие с запада, приносят циклоны, которые обуславливаются пасмурной ветряной погодой, осадками. Зимой вызывают потепление, а в летний период сопровождаются прохладной погодой. Антициклоны сопровождаются малооблачной, сухой погодой, приносящие летом жаркую погоду, зимой холодную. Арктические воздушные массы, приходящие с севера, характеризуются сухим и очень холодным воздухом. В такой период температура резко падает, но погода ясная. В зоне антициклона летом можно наблюдать заморозки, зимой сильные морозы. Такое непостоянство погоды является причиной межсуточных колебаний метеорологических показателей, таким образом перепады температуры воздуха могут составлять 20 и более градусов.

Сложность в прогнозировании метеорологических параметров вызвана большой протяженностью территории, разнообразие ландшафта, близость крупных водоемов. В Ленинградской области встречаются практически все опасные метеорологические явления [4].

На рисунке 1.5 представлена информация о средних многолетних данных о температуре воздуха и количестве осадков.

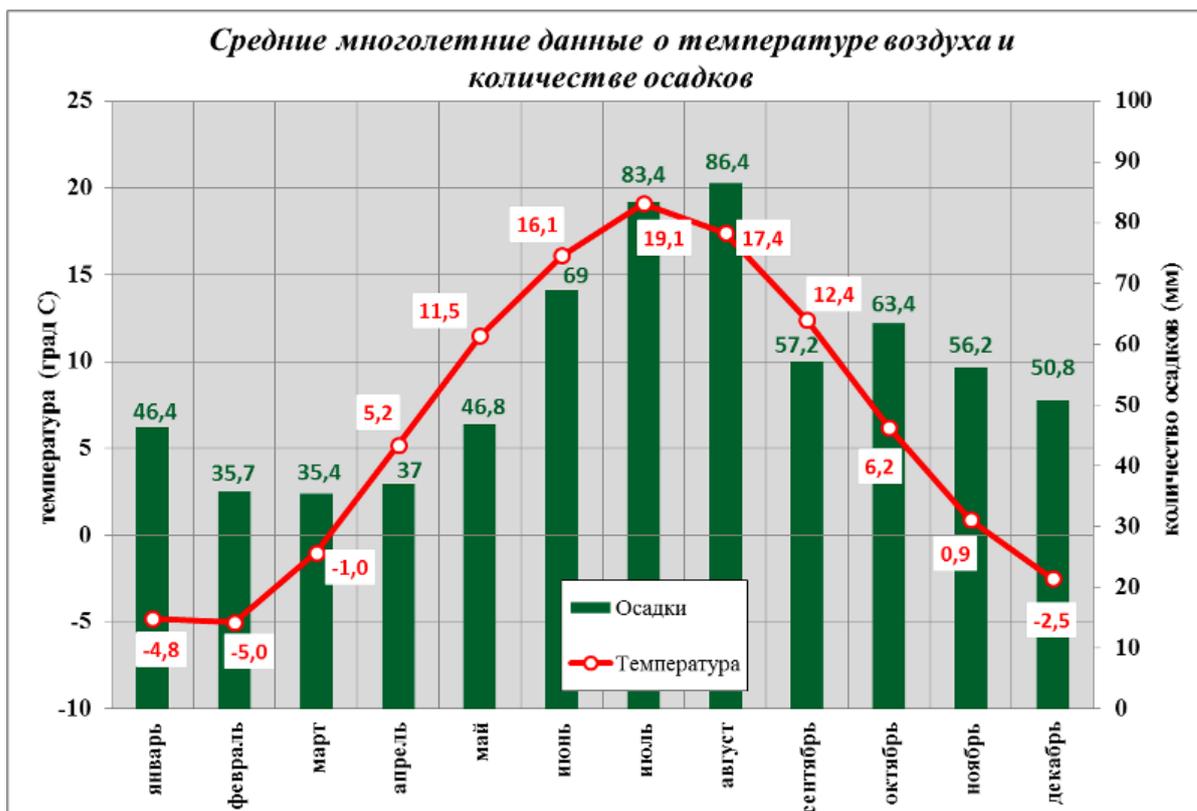


Рисунок 1.5 – Средние многолетние данные о температуре воздуха и количестве осадков в Санкт-Петербурге

1.6 Гидрологическая изученность

Ленинградская область характеризуется высокой степенью гидрологической изученности благодаря большому количеству гидрологических станций и постов наблюдения, функционирующих в течение длительного периода времени.

Область богата поверхностными водоемами, такими как Ладожское озеро, Финский залив, реки Нева, Волхов, Свирь, Луга и другие мелкие водоемы (рисунок 1.6).

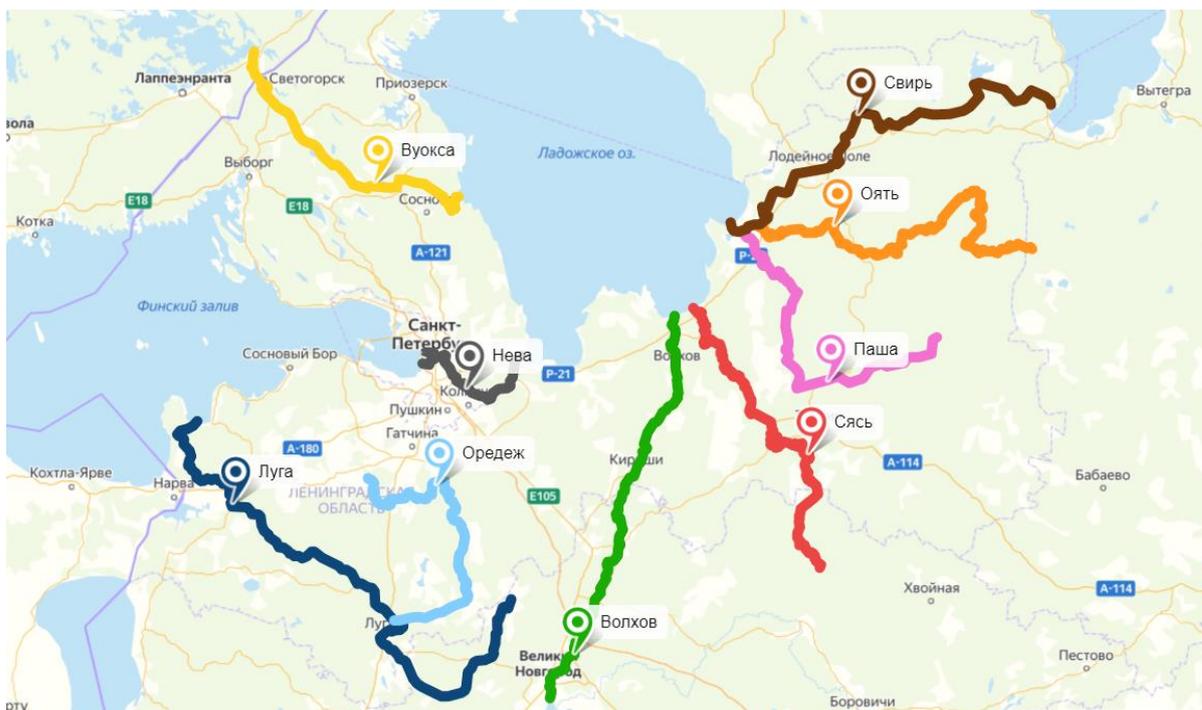


Рисунок 1.6 – Девять крупных рек Ленинградской области

Тосненский район расположен в южной части Ленинградской области и отличается значительной плотностью сети малых рек и ручьев, а также наличием большого количества болотистых участков и мелких озер.

Главной рекой района, характеризующаяся невысокими значениями расхода воды и быстрым течением, является Тосна. Имеет смешанное питание, с преобладанием снеговых масс весной и дождевых осадков летом.

Основные гидрографические характеристики р. Тосна представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные гидрографические характеристики

Река-пост	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м БС	Уклон реки, ‰		Озерность, %	Заболоченность, %	Лесистость, %
			средний	средне-взвешенный			
р.Тосна - ст.Тосно	1300	54	0.40	0.39	1	12	75

В таблице 1.2 представлена гидрологическая изученность р. Тосна.

Таблица 1.2 – Гидрологическая изученность

Код поста	Название водного объекта	Название поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Период действия	
					открыт	закрит
72042	р.Тосна	д.Рубежи	46.0	1210	25.08.1915	01.08.1941
72043	р.Тосна	ст.Тосно	36.0	1300	01.01.1920 16.03.1944	Действ.

Большое количество заболоченных территорий способствует замедлению оттока влаги и увеличению запасов подземных вод.

Широко развиты горизонты пресных подземных вод, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения.

1.7 Экологическое состояние реки Тосна

Прибрежные территории Ленинградской области относятся к зоне повышенного экологического риска, что обуславливается хозяйственной деятельностью, строительством и рекреацией.

В 2022 году проводилось исследование экологического состояния вод Ленинградской области, на р. Тосна пункт наблюдения располагался в п. Усть-Тосно, наблюдения проводились ежемесячно. Среднегодовые значения были превышены по следующим показателям: ХПК, БПК₅, азот нитритный, железо общее, медь, цинк, марганец.

Классификация вод по результатам исследования представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 — Результаты гидролого-экологического состояния вод р. Тосна – п. Усть-Тосно в 2021-2022 годах

Год	Показатель УКИЗВ	Класс	Разряд
2021	3,30	3	б
2022	3,72	3	б

В Тосненском районе находится полигон для захоронения и обезвреживания токсичных отходов «Красный Бор» (рисунок 1.7), который на данный момент закрыт для приема отходов. При высоких паводках и длительных обильных дождях возможно загрязнение вод реки Тосна, которая впадает в р. Нева, являющуюся источником водоснабжения Санкт-Петербурга и прилегающих территорий.



Рисунок 1.7 — Полигон «Красный Бор»

Результаты гидрохимического исследования показали, что значение рН находилось в норме, взвешенные вещества отмечали высокое содержание в январе и июне, кислород был ниже показателей в июне, августе и сентябре.

Значение ХПК, железа общего и меди отмечалось высоким во всех отобранных пробах [5].

2. Обзор существующих методик прогноза элементов весеннего половодья

2.1 Эмпирический метод прогноза уровней воды

В работе В.А. Бузина «Методы расчёта и прогнозирования зажорных и заторных уровней воды» отмечается возможность применения эмпирического метода прогнозирования ледовых явлений на участках постоянных скоплений льда. Этот метод основывается на корреляционных связях между максимальной высотой водных преград и определяющими её факторами.

Для прогноза образования заторов льда на реке Северной Двине применяется специальная формула расчета высоты подъема уровня воды вследствие зазора. Эта высота зависит от объема воды, проходящего через кромку льдин (расход), продолжительности ледовых процессов и особенностей погодных условий.

Расчетная схема включает следующие этапы:

1. Определение расхода воды – учитывается начальный объем воды и погодные условия (температура, ветер).

2. Вычисление длительности процесса – определяется временем прохождения кромки льда от одного участка реки до другого, учитывая дистанцию и скорость движения льда.

3. Анализ влияния крупных водоемов, особенно озёр, расположенных вверх по течению. Чем больше накопленный водой объём озера, тем точнее можно спрогнозировать критические уровни водного стока зимой.

Прогнозирование зажоров осуществляется посредством краткосрочного (до пяти суток) и среднесрочного (ежемесячного) метеорологического мониторинга.

Реки вроде Амура, Ангары, Селенги, Северной Двины демонстрируют четкую зависимость между наибольшими уровнями затопления в процессе

ледообразования и наивысшими показателями накануне зимы, что позволяет строить достоверные предсказания пиковых показателей ледовых заторов за несколько месяцев вперед.

При отсутствии длительных рядов измерений максимальная высота зажора или затора вычисляется исходя из значений летнего графика распределения водного потока относительно расходов воды.

В случае отсутствия многолетних данных наблюдений максимальный зажорный/заторный уровень определяется отношением расхода воды у перемещающейся вниз по течению кромки ледяного покрова к зимнему коэффициенту.

При этом продолжительность осеннего ледохода $T_{лх}$ и зимний коэффициент K_{Q_3} находятся по следующим формулам:

$$T_{лх} = -10,9 \frac{Q_{кр}^{0,5}}{Q_{эп} \cdot B^{0,1}} \left(\frac{J_{Q_{кр}}}{n_p} \right)^{0,375}, \quad (2.1)$$

$$K_{Q_3} = 8,13 \left(\frac{\varphi t_{л}}{B} \right)^{0,38} \cdot (K_{Q_{лс}} - 1) + 1, \quad (2.2)$$

где φ – отношение прочности льда в последний день ледостава и прочности льда в начале его таяния;

$K_{Q_{лс}}$ – значение зимнего коэффициента при максимальном уровне воды в начале ледостава.

Для определения $Q_{кр}$ есть два способа. Первый способ основывается на методе соответственных по ледовым фазам расходов воды и применяется в случае бесприточного участка реки выше по течению, а второй строится на теории о том, что процесс формирования льда длится несколько дней, такой метод используется для рек, где расстояние между створами более 200 км или на участке впадает крупный раньше вскрывающийся приток, влияющий на процесс заторообразования.

Эффективность методик прогнозирования оценивается по специальным показателям, таким как отношение средней квадратической погрешности к стандартному отклонению фактических отметок от нормативных значений и величине отклонения изменений прогнозируемых уровней за установленный временной интервал.

Оценка показала, что метод прогноза максимальных зажорных уровней дает результат несколько хуже, чем метод прогноза заторных уровней из-за использования недостаточно точного прогноза погоды.

О надежности метода можно судить только после 7 – 10 лет испытаний.

Полученные данные активно используют при проектировании гидротехнических объектов, включая дамбы, мостовые конструкции, пирсы и другие сооружения. Выводы исследования легли в основу нормативного документа СНиПа, регламентирующего порядок определения расчётных гидрологических характеристик в обновленной версии стандарта.

Методы прогнозирования заторных и зажорных явлений, приводящих к наводнению, разработанные автором, используются в трех региональных управлениях Росгидромета и в гидрометслужбах трех европейских стран.

Заблаговременность прогноза составляет 3-6 суток, что дает возможность уменьшить потери до 40-70% [6].

2.2 Прогноз заторно-зажорных уровней воды на основе прогноза максимального расхода во время ледохода

Статья О.Г. Савичева и В.А. Лыгина описывает новую методику расчёта максимального расхода воды в таёжных реках Западной Сибири, особенно там, где недостаточно гидрометрических данных. Методика упрощает оценку максимального уровня воды и повышает точность результатов.

При расчёте учитываются следующие факторы:

- Половодье: берётся половина объёма зимних осадков (декабрь-май), включая снегопады и апрельско-майские дожди;
- Летне-осенние паводки: принимаются во внимание примерно половина августовских осадков. Разность между осадками и фактическими расходами воды приближенно равна среднерасчётному испарению.

Первая часть исследования сосредоточилась на прогнозе пиковых значений расхода воды во время вскрытия рек. Предложенная формула учитывает влияние льда на гидравлику течения, используя два ключевых параметра:

- коэффициент η , отражающий соотношение расходов воды в моменты ледохода и максимума половодья;
- коэффициент K_w , компенсирующий изменения условий движения потока из-за наличия льда.

Коэффициент η определяется зависимостью от отношения среднего расхода воды на пиковых значениях половодья, вычисленной по специальной эмпирической формуле, проверенной на примере реки Томь близ города Томск.

Эта методика помогает точнее моделировать уровни воды и минимизирует затраты на обработку данных. Результат показал, что при использовании выбранных параметров достигнута высокая точность прогноза [7].

2.3 Прогноза максимального заторного уровня на данных ледовой авиаразведки

Статья В.А. Бузина «Закономерности формирования и прогноз максимального уровня воды при заторе льда» посвящена исследованию закономерностей образования заторных уровней воды и разработке методов их прогнозирования на основании авиационной разведки состояния льда,

предложенной А.С. Рудневым. Основным принципом заключается в классификации типов заторов, однако точность такого способа остается невысокой.

Для повышения точности предлагается учитывать характеристики движения льда на верховых участках рек и их притоках, влияющие на количество льда в месте затора. Однако прямое использование приведенных формул затруднено из-за отсутствия некоторых ключевых параметров — продолжительности формирования затора и скорости продвижения льдин к месту скопления.

Подъем уровня воды при образовании затора объясняется двумя факторами: увеличением расхода воды и сужением русла вследствие накопления льда, а также дополнительным гидродинамическим сопротивлением ледяного покрова. Р.В. Донченко предложил эмпирическое соотношение глубины потока при наличии затора и свободном состоянии реки, позволяющее оценить подъем уровня воды:

$$h_3 = 17,3h_0I_0^{0,3}. \quad (2.3)$$

После преобразований формула принимает вид:

$$A_3 = \Delta H_3 / (0,418 + 1180I_0). \quad (2.4)$$

Формула расчета длины скопления льда учитывает интенсивность и длительность ледохода выше места затора, характеризуя процесс его развития. Важным параметром является коэффициент упаковки льда (r), определяемый балансом объемов поступающего и уплотняющегося льда.

Таким образом, представленные формулы составляют основу методики прогнозирования максимальной высоты заторного подъема уровня воды. Несмотря на ряд ограничений, предварительные оценки показывают удовлетворительную достоверность прогнозов порядка 70% [8].

2.4 Прогноз максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины

На узле рек Сухона-Юг-Малая Северная Двина часто наблюдается заторное явление, созданные реками Сухона и Малая Северная Двина у г. Великий Устюг, в результате чего наблюдается периодическое затопление прибрежных территорий. На данный момент прогноз максимальных заторных уровней воды составляется для участков у д. Каликино и г. Великий Устюг р. Сухона.

Предложенная методика основана на учете ряда факторов, влияющих на формирование заторов:

- Количество и физические свойства льда в заторе;
- Водность реки в период вскрытия;
- Последовательность вскрытия рек (порядок освобождения рек ото льда).

Для прогноза максимального заторного уровня используется следующая формула:

$$H_z = f(H_{\text{лед}}, t_{\text{лед}}, Q_{\text{Тотьма}}, \theta), \quad (2.5)$$

где $H_{\text{лед}}$ – Начальный уровень льда;

$t_{\text{лед}}$ – толщина льда;

$Q_{\text{Тоты}}$ – расход воды Сухоны в первый день ледохода у г. Тотьма;

θ – температура воздуха на дату составления прогноза.

Оценка методики производилась по критериям отношения средней квадратической ошибки прогноза к природной вариации предсказываемого уровня и отношению ошибки прогноза к вариации изменения уровня за период заблаговременности прогноза.

Река	Пункт	Средняя заблаговременность прогноза, сутки	s , см	Оценка эффективности через среднее квадратическое отклонение от нормы									
				уровня					изменения уровня за период заблаговременности				
				s/σ_H	Допустимая погрешность, см	P , %	\bar{H} , см	$P_{пр}$, %	$s/\sigma_{\Delta H}$	Допустимая погрешность, см	P , %	$\bar{\Delta H}$, см	$P_{пр}$, %
Сухона	д. Каликино	2	101	0,67	102	72	598	51	0,80	85	60	263	55
	г. В. Устюг	3	92	0,59	104	70	587	56	0,64	114	74	277	46
Юг	д. Гаврино	3	74	0,65	77	90	415	62	0,54	92	89	163	28
С. Двина	д. Медведки	4	66	0,71	63	62	551	39	0,58	77	72	277	44
	г. Котлас	5	64	0,56	77	83	475	35	0,47	91	80	264	59

Рис. 2.1 — Характеристики качества методик прогнозов максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины

Прогнозы характеризуются как удовлетворительные как по критерию s/σ_H , так и по $s/\sigma_{\Delta H}$.

Результат оценки значимости по критериям Стьюдента и Фишера при уровне значимости $\alpha = 5\%$ представлен на рисунке 2.2.

Река – пункт	Расчетные периоды наблюдений		Статистические характеристики									
			Критерий Стьюдента			Критерий Фишера			Коэффициенты уравнения тренда			
			Средние за период, см		S_T	Дисперсия за период, см		F	a		b	
			1	2		1	2		1	2	1	2
Сухона – г. Великий Устюг	1882–1952	1953–2010	648	612	1,23	179,87	142,11	1,60	0,5781	-0,278	627,3	619,89
	1882–1962	1963–2010	650	601	1,63	176,97	137,04	1,67	0,4496	1,2683	631,3	570,34
Малая Северная Двина – г. Котлас	1933–1956	1957–2010	552	474	3,3	82,23	100,27	0,67	1,0139	-1,841	538,83	524,36

Рис. 2.2 — Значения критериев Стьюдента и Фишера и коэффициентов линейных уравнений трендов максимальных заторных уровней воды Сухона и Малой Северной Двины

Методика позволяет составить прогноз подъёма уровня воды, вызванных затором на реках Вычегда, Юг и Малая Северная Двина, за 1–6 дней. Это даёт возможность вовремя провести эвакуацию населения из опасных зон, предотвратить серьёзные разрушения и минимизировать экономические потери. Для эффективного предотвращения ущерба

необходимо ежедневно отслеживать состояние льда на указанных реках, анализировать ситуацию и оперативно реагировать, обеспечивая защиту населённых пунктов и природной среды [9].

3. Исходные данные

3.1 Объект исследования

Для исследования была выбрана р. Тосна – г. Тосно, в связи с практически ежегодным подъемом уровней, вызванных таянием снега и обильных осадков. По данным открытых источников [10, 11] в 2023 году 26 марта и 9 октября наблюдалось затопление территории. Опубликованная информация [12, 13, 14] свидетельствует о желтом уровне опасности 1 – 3 февраля 2025 года. Уровень воды 22 апреля 2025 года поднялся на 63.3 см, что превышало критическую отметку на 2.3 см. В этот период наблюдалось подтопление 250 дворов. На рисунке 3.1 представлено затопление территории в районе Тосно.



Рисунок 3.1 — Затопление территории в г. Тосно в апреле 2025 года

В феврале 2025 года аварийно-спасательные службы проводили мониторинг уровня воды в р. Тосна, так как наблюдалось повышение уровня. Дороги, проходящие по набережной, были подтоплены (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 — Подтопление дороги возле р. Тосна

Река Тосна берет свое начало в д. Поддубье, протекает через Лужский, Тосненский и Кировский районы Ленинградской области и впадает в р. Нева.

Гидрологический пост р. Тосна – г. Тосно находится в 0.5 км от станции, в 0.6 км ниже устья руч. Андреев.

Пост расположен на левом берегу, в 75 м ниже железнодорожного моста и состоит из свай и реперов. Отметка нуля поста 24.69 м Балтийской системы.

Два контрольных участка (гидроствора) располагаются чуть выше поста: один в 80 метрах, второй в 75 метрах. Измерение водных потоков производится либо с мостиков под железнодорожным мостом, либо пешим переходом вброд.

Гидроствор № 1 расположен в 80 м, гидроствор № 2 – в 75 м выше поста. Расходы воды на гидростворе № 2 измеряются с мостика под фермами железнодорожного моста, на гидроствора № 1 – вброд.

Площадь водосбора реки Тосна, согласно гидрологическим ежегодникам, составляет 1300 км².

3.2 Сбор и обработка исходных данных

Сток за половодье

Для прогноза слоя стока половодья были собраны данные максимальных расходов воды с датами максимальных пиков в период с 1966 по 2007 из гидрологических ежегодников, с 2008 по 2022 с автоматизированной информационной системой государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [15]. Данные представлены в таблице 3.1.

Слой стока половодья были рассчитаны по формуле:

$$Y = \frac{\bar{Q} \cdot T}{F \cdot 1000}, \quad (3.1)$$

где \bar{Q} – средней расход воды за период весеннего половодья;

T – время весеннего половодья в секундах;

F – площадь водосбора реки.

Таблица 3.1 — Исходные данные максимальных расходов воды и слоя стока за период весеннего половодья

Год	Дата	Q_{\max}	$Y_{\text{пол}}$	Год	Дата	Q_{\max}	$Y_{\text{пол}}$
1966	02.05	206	233	1995	22.04	132	216
1967	12.04	96,0	103	1996	25.04	71	88,5
1968	07.04	86,4	124	1997	06.04	69,2	142
1969	22.04	104	112	1998	25.04	141	123
1970	24.04	83,3	123	2000	15.04	83,9	92,0
1971	13.04	126	212	2001	11.04	104	93,0

Продолжение таблицы 3.1

Год	Дата	Q_{\max}	$Y_{\text{пол}}$	Год	Дата	Q_{\max}	$Y_{\text{пол}}$
1972	18.04	103	108	2002	02.04	65,6	91,1
1973	12.04	18,8	65,0	2003	12.01	70,8	57,8
1974	09.05	69,2	276	2004	13.04	97,4	130
1975	09.04	65,4	149	2005	13.04	150	125
1976	19.04/20.04	92,5	113	2006	14.04	61,8	78,3
1977	20.04	103	117	2007	13.01	67,1	54,0
1978	18.04	130	114	2008	12.04	102	122
1979	29.04	87,3	134	2009	18.04	77,3	74,3
1980	27.04	132	103	2010	12.04	173	178
1981	14.04	95,8	111	2011	21.04	136	170
1982	11.04	135	141	2012	20.04	95,4	95,9
1983	05.04	177	113	2013	21.04	161	115
1984	10.04	136	119	2014	15.05	31,1	58,7
1985	25.04	114	117	2015	18.04	65,6	85,9
1986	25.04/26.04	105	162	2016	25.11	76,8	81,5
1987	03.05	102	149	2017	27.04	71,2	28,8
1988	09.04	110	118	2018	19.04	135	42,1
1989	10.02	61,7	116	2019	03.04	107	35,8
1990	28.02	120	138	2020	07.03	74,2	137,6
1991	09.04	120	149	2021	03.04	78,1	141,7
1993	09.04	54,3	98,9	2022	15.04	91,8	115,5
1994	09.04	94,3	100	—	—	—	—

Максимальный уровень воды

Для прогноза наивысших уровней собраны сведения о максимальных уровнях воды в р. Тосна из гидрологических ежегодников до 2007 и с 2008 с АИС ГМВО [16]. Собранные данные представлены в таблице 3.2. Уровни

воды разделены на пиковые уровни в период весеннего половодья (оранжевым цветом) и в период паводков (синий цвет). В период половодья наблюдалось 87 пиков, в период паводков 143 пика.

Согласно открытым источникам, отметка неблагоприятного явления, при котором вода выходит на пойму составляет 512 см, опасного – 668 см, начинается подтопление населенных пунктов, объектов строительства [17]. Отметки неблагоприятного явления в таблице 3.2 выделены желтым цветом, опасного – красным.

Таблица 3.2 — Сведения о наивысших уровнях воды

Год	Дата	H_{\max}	Год	Дата	H_{\max}
1966	02.5	668	1990	11.02	398
1967	12.4	489		28.02	570
1968	07.4	492		23.03	393
	05.11	578		31.08	180
1969	22.04	536		26.09	236
	17.05	408		12.10	257
	21.05	406		22.10	282
1970	24.04	482		23.10	282
	29.04	469		24.10	282
	29.09	312		20.11	287
	20.10	375	06.12	236	
	21.10	375	1991	15.01	210
	19.11	375		28.02	166
	20.11	375		24.03	274
1971	12.04	569	09.04	569	
	21.04	480	27.04	349	
	15.06	358	07.05	322	
1972	18.04	536	18.05	232	

Продолжение таблицы 3.2

Год	Дата	H_{\max}	Год	Дата	H_{\max}
1973	05.04	249		27.05	226
	12.04	274		09.06	371
	18.05	195		21.11	278
1973	21.06	238	1991	17.12	217
	28.10	228	2008	12.04	532
	11.11	233		02.11	338
1974	10.04	396		04.12	373
	09.05	444	05.12	373	
	12.06	314	2009	18.04	481
	13.06	314		21.06	302
	05.07	325		22.08	255
	09.08	412		10.09	270
	17.11	380		08.10	260
	28.12	360		19.10	312
1975	05.01	335		20.10	312
	22.01	332		28.10	312
	09.04	434	26.11	386	
	14.04	419	06.12	360	
1976	19.04	517	2010	12.04	635
	20.04	517		15.11	315
	06.05	442	2011	21.04	599
23.06	343	08.12		341	
1977	20.04	536		20.12	325
	18.11	334	30.12	331	
1978	03.04	386	2012	20.04	513
	18.04	588		21.04	513
	12.08	330		09.11	408

Продолжение таблицы 3.2

Год	Дата	H_{\max}	Год	Дата	H_{\max}	
1978	17.09	370	2013	17.11	389	
	26.10	276		18.11	389	
	24.11	333		21.04	634	
1979	15.04	404	2013	20.05	390	
	29.04	474		07.11	315	
	09.08	260		11.11	311	
	29.11	272		12.11	311	
	07.12	324		12.01	273	
1980	27.04	586	2014	19.02	243	
	24.11	394		27.03	281	
1981	26.03	283		17.4	297	
	14.04	517		15.5	333	
	30.04	376		04.06	340	
	01.06	272		2015	13.03	326
	22.06	252			07.04	349
	01.11	382	18.04		429	
11.04	592	01.05	307			
1982	27.10	336	2016	18.04	422	
	18.11	311		08.07	411	
	24.12	294		03.08	478	
	05.04	636		22.08	294	
1983	22.05	298		25.11	466	
	27.12	286		29.12	291	
	10.04	598		2017	03.01	319
02.11	318	24.03			369	
1985	25.04	558	07.04		394	
	15.06	325	27.04		449	

Продолжение таблицы 3.2

Год	Дата	H_{\max}	Год	Дата	H_{\max}
1985	17.10	297		31.07	348
	18.10	297		27.08	434
	14.11	334		14.10	427
1986	08.04	460	2017	16.12	363
	26.04	540	2018	08.01	392
	14.07	258		12.04	513
	03.09	374		19.04	596
	06.09	394		09.10	304
	24.09	346		16.11	281
	13.10	280	2019	03.04	548
	06.11	250		09.05	288
	14.11	272		31.05	320
	08.12	282		12.11	506
1987	03.05	531		10.12	436
	23.05	493		20.12	380
	29.06	445		26.12	362
	09.08	460	27.12	362	
	18.08	449	17.01	427	
	26.09	332	25.02	413	
1988	06.01	260	2020	07.03	470
	07.01	260		14.03	408
	09.04	520		20.04	246
	22.04	364		21.04	246
	02.05	296		06.05	254
	27.05	220		20.05	265
	02.07	220		10.06	251
	15.07	224		28.11	278

Продолжение таблицы 3.2

Год	Дата	H_{\max}	Год	Дата	H_{\max}
1988	13.08	305	2021	02.04	471
	01.10	223		03.04	471
	30.10	262		09.05	464
1988	31.10	262	2021	01.07	241
1989	10.02	442		12.11	240
	06.03	364	2022	27.02	250
	07.03	364		29.03	317
	18.03	400		30.03	317
	28.03	398		14.04	505
	13.04	260		02.09	172
	02.07	163		03.09	172
	07.08	189		05.10	298
	13.08	227		30.10	297
	28.09	296		31.10	297
	04.11	264		—	—
	17.11	227	—	—	—
	07.12	197	—	—	—
	24.12	193	—	—	—

Для анализа связи максимальных уровней воды и максимальных расходов воды в период весеннего половодья (таблица 3.3) построены графики связи (Приложение Б).

Таблица 3.3 — Сопоставление максимальных уровней воды и максимальных расходов воды в р. Тосна за период весеннего половодья

Год	Дата	H_{\max}	Q_{\max}	Год	Дата	H_{\max}	Q_{\max}
1966	02.05	668	206	1990	28.2	570	120
1967	12.4	489	56,2		23.3	393	51
1968	7.4	492	86	1991	24.3	274	15
1969	22.4	536	103		9.4	569	120
1969	17.5	408	55,8	1991	27.4	349	37,9
	21.5	406	55,2		7.5	322	31,4
1970	24.4	482	—		18.5	232	14,3
	29.4	469	—		27.5	226	13,4
1971	12.4	569	118	2008	12.4	532	102
	21.4	480	78,5	2009	18.4	481	76,9
1972	18.4	536	58,7	2010	12.4	635	172
1973	5.4	249	—	2011	21.4	599	136
	12.4	274	—	2012	20.3	513	94,2
1973	18.5	195	—	2012	21.4	513	94,2
1974	10.4	396	—	2013	21.4	634	160
	9.5	444	—		20.5	390	10,2
1976	9.4	434	8,86	2014	27.3	281	20,5
	14.4	419	20,6		17.4	297	23,4
	19.4	517	92		15.5	333	30,8
	20.4	517	92		4.6	340	4,63
	6.5	442	62,7	2015	7.4	349	40,6
1977	20.4	536	103		18.4	429	64,7
1978	18.4	588	130	2015	1.5	307	13,9
1979	15.4	404	53,7	2016	18.4	422	62,4
	29.4	474	87,3	2017	24.3	369	38,1
1980	27.4	586	130		7.4	394	53,8

Продолжение таблицы 3.3

Год	Дата	H_{\max}	Q_{\max}	Год	Дата	H_{\max}	Q_{\max}
1981	26.3	283	12,4	2018	27.4	449	71,2
	14.4	517	95,8		12.4	513	90,3
	30.4	376	45,7	19.4	596	135	
1982	11.4	592	135	2019	3.4	548	107
1983	5.4	636	173		9.5	288	21,7
1984	10.4	598	136	2020	7.3	470	72,7
1985	25.4	558	114		14.3	408	51,5
1986	8.4	460	74,8		20.4	246	9,59
	26.4	540	105		21.4	246	9,56
1987	3.5	531	101		6.5	254	8,46
	23.5	493	86,4		20.5	265	7,72
1988	9.4	520	110		2021	2.4	471
	22.4	364	46,5	3.4		471	78,1
	2.5	296	28,6	9.5		464	75,5
1989	6.3	364	45,1	2022	29.3	317	19,7
	7.3	364	45,1		30.3	317	20
	18.3	400	56,4		14.4	505	91,1
	28.3	398	56,9	—	—	—	
	13.4	260	20,5	—	—	—	

Осадки периода снеготаяния и половодья

Чтобы провести необходимые расчеты, нужны сведения о метеорологической обстановке. Самой близкой к месту наблюдения метеорологической станцией оказалась станция Белогорка. Все исходные данные были получены с официального ресурса Федерального агентства по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [18].

Собранные данные включают в себя суточные записи о температуре воздуха, количестве выпавших осадков и высоте снежного покрова (таблица 3.4).

Даты начала и окончания весеннего половодья были определены по ежегодным хронологическим графикам максимальных расходов воды.

Осадки могут оказывать высокое влияние на сток, так как они близки к условиям стекания талых вод, но имеют другие условия водопоглощения. Дождевой сток и количество осадков, выпавших в период снеготаяния, стоит рассчитывать отдельно. Сумма осадков складывается из твердых осадков, выпавших с даты, когда наблюдалась максимальная высота снежного покрова, до окончания периода снеготаяния, и жидких осадков, выпавших с даты схода снега до даты окончания половодья. Данные расчеты возможно произвести на основе метеорологических данных.

Из-за разных условий поглощения и потерь жидкие осадки прибавляются с коэффициентом 0.5.

Таблица 3.4 — Исходные гидрометеорологические данные

Год	Дата	Q_{\max}	$Y_{\text{пол}}$	Дата макс. высоты снеж. покрова	Макс. высота снеж. покр.	Дата схода снега	Дата начала половодья	Дата окончания половодья	$\sum X_{\text{снет}}$	$\sum X_{\text{половодье}}$	$X_1+0.5X_2$
1966	02.05	206	233	18.02	80	29.04	01.04	27.05	151	22.4	163
1967	12.04	96.0	103	08.02	46	02.04	29.03	20.05	45.7	101	96.1
1968	07.04	86.4	124	16.03	57	12.04	22.03	09.06	61.0	58.3	90.2
1969	22.04	104	112	10.03	67	16.04	09.04	19.06	39.0	104	91.0
1970	24.04	83.3	123	25.02	55	11.04	06.04	15.05	54.2	61.2	84.8
1971	13.04	126	212	11.03	70	24.04	22.03	10.06	92.7	36.8	111
1976	19.04 / 20.04	92.5	113	26.03	78	03.05	29.03	29.05	61.0	68.0	95.0
1977	20.04	103	117	6.03	53	22.04	02.04	18.05	79.3	27.9	93.3
1978	18.04	130	114	26.02	45	28.04	12.04	14.05	105	4.10	107
1979	29.04	87.3	134	14.02	76	17.04	28.03	28.05	30.1	65.0	62.6
1980	27.04	132	103	04.03	55	15.04	04.04	11.06	20.4	58.1	49.5
1981	14.04	95.8	111	16.03	52	06.04	22.03	27.05	15.0	49.4	39.7
1982	11.04	135	141	11.02	71	21.04	25.03	13.05	53.7	14.6	61.0
1983	05.04	177	113	08.03	37	16.04	24.03	28.04	84.7	10.0	89.7
1984	10.04	136	119	10.02	75	12.04	30.03	06.05	27.1	4.50	29.4
1985	25.04	114	117	13.03	48	17.04	08.04	25.05	30.5	51.3	56.2

Продолжение таблицы 3.4

Год	Дата	Q_{\max}	$Y_{\text{пол}}$	Дата макс. высоты снеж. покрова	Макс. высота снеж. покр.	Дата схода снега	Дата начала половодья	Дата окончания половодья	$\sum X_{\text{снет}}$	$\sum X_{\text{половодье}}$	$X_1+0.5X_2$
1986	25.04 / 26.04	105	162	06.03	53	17.04	22.03	01.06	50.5	69.8	85.4
1987	03.05	102	149	04.03	51	14.04	04.04	28.05	23.5	94.4	70.7
1988	09.04	110	118	19.03	38	29.04	22.03	24.05	48.9	20.2	59.0
1989	10.02	61.7	116	01.01	35	04.04	25.02	13.05	117	30.7	132
1990	28.02	120	138	24.01	28	09.04	19.02	23.04	163	7.8	167
1991	09.04	120	149	24.02	31	27.04	20.03	06.06	107	55.9	135
1993	09.04	54.3	98.9	22.02	21	14.04	15.03	27.05	50.2	40.6	70.5
1994	09.04	94.3	100	25.02	33	06.04	31.03	20.05	57.0	45.4	79.7
1995	22.04	132	216	11.02	52	16.04	17.02	15.06	110	151	186
1996	25.04	71.0	88.5	02.04	44	26.04	09.04	16.06	36.0	112	91.9
1998	25.04	141	123	08.02	38	19.04	30.03	23.05	110	38.4	129
2000	15.04	83.9	92.0	05.02	27	07.04	29.02	24.05	81.7	40.1	102
2001	11.04	104	93.0	07.03	37	17.04	31.03	13.05	55.5	28.6	69.8
2002	02.04	65.6	91.1	01.01	46	19.04	19.03	07.05	150	11.5	156
2003	12.01	70.8	57.8	15.02	36	08.04	11.04	30.05	36.5	115	93.9
2004	13.04	97.4	130	18.02	43	10.04	19.03	13.05	56.0	4.3	58.2
2005	13.04	150	125	20.03	38	05.04	03.04	31.05	0.2	123	61.8

Продолжение таблицы 3.4

Год	Дата	Q_{\max}	$Y_{\text{пол}}$	Дата макс. высоты снеж. покрова	Макс. высота снеж. покр.	Дата схода снега	Дата начала половодья	Дата окончания половодья	$\sum X_{\text{снет}}$	$\sum X_{\text{половодье}}$	$X_1+0.5X_2$
2006	14.04	61.8	78.3	01.03	40	11.04	08.03	29.05	47.3	62.1	78.4
2007	13.01	67.1	54.0	02.03	28	14.03	29.03	13.05	24.1	74.2	61.2
2008	12.04	102	122	26.03	20	04.04	29.03	14.05	9.8	61.3	40.5
2009	18.04	77.3	74.3	21.03	24	10.04	28.03	14.05	25.2	11.7	31.1
2010	12.04	173	178	14.03	84	07.04	28.03	16.05	38.3	44.6	60.6
2011	21.04	136	170	27.02	71	17.04	03.04	18.05	41.9	18.4	51.1
2012	20.04	95.4	95.9	12.03	36	16.04	06.04	19.05	45.2	51.6	71.0
2013	21.04	161	115	21.02	46	18.04	10.04	09.06	28.5	102	79.7
2014	15.05	31.1	58.7	21.03	14	23.03	08.03	27.05	4.5	62.2	35.6
2015	18.04	65.6	85.9	08.02	45	21.04	28.03	11.06	57.1	98.2	106
2016	25.11	76.8	81.5	19.01	24	15.03	28.03	20.05	87.0	105	139
2017	27.04	71.2	28.8	27.02	20	25.04	17.03	29.05	104	37.0	123
2018	19.04	135	42.1	19.02	28	07.04	03.04	19.05	41.8	57.5	70.6
2019	03.04	107	35.8	08.02	54	12.04	16.03	19.05	77.4	48.8	102
2020	07.03	74.2	138	27.02	12	03.03	09.02	04.06	7.0	156	85.2
2021	03.04	78.1	142	22.02	36	05.05	24.03	05.06	108	115	165
2022	15.04	91.8	116	02.02	56	14.04	20.03	24.05	83.9	28.0	97.9

Запас воды в снежном покрове

Данные массива «Маршрутные снегомерные съемки» по полевым и снегомерным маршрутам по метеостанции Белогорка также использовались для определения максимальных запасов воды в снежном покрове [19]. Массив содержит информацию о суммарном запасе воды в снежном покрове, а также отдельно в поле и лесу, основанные на маршрутных снегомерных съемках, проводимых по регламенту маршрутных снегосъемок через каждые 10 дней в течение холодного периода (каждые пять дней в период интенсивного снеготаяния). Длина маршрута составляет 1 или 2 км (в поле и в лесу).

Средние для бассейна снегозапасы определяются по выражению

$$S = (1 - \varphi)S_{\text{поле}} + \varphi S_{\text{лес}}, \quad (3.2)$$

где $S_{\text{поле}}$ и $S_{\text{лес}}$ — средние значения максимальных запасов воды в снежном покрове соответственно в поле и в лесу

$\varphi = 0.75$ — лесистость бассейна в долях единицы.

Различия в процессе испарения и влияние оттепели, ветрового воздействия влияют на формирование снежного покрова в лесах и полях. Так, в верхних частях склонов запасы воды в снеге к началу весны примерно на 20% меньше, а в нижних частях на 20% больше, чем в средней части склона. Такие закономерности характерны для всех регионов лесостепной зоны с протяженностью открытых участков от 300 до 800 м. В ложбинах между холмами содержание воды в снеге сопоставимо с показателями нижних частей склонов. Общие объемы водозапаса на открытых пространствах близки к показателям центральных зон склонов [15].

В таблице 3.5 приведены данные о максимальных запасах воды в снежном покрове, а также статистические характеристики рядов.

Таблица 3.5 – Ряды максимальных запасов воды в снежном покрове по данным метеостанции Белогорка (1966 – 2020 гг.)

Год	Запас воды, общий		Суммарный запас воды
	поле	лес	
1965/66	211	176	183
1966/67	86	86	85
1967/68	122	92	98
1969/70	111	104	105
1970/71	138	—	33
1971/72	50	38	41
1973/74	88	105	100
1974/75	55	26	33
1975/76	175	145	151
1976/77	89	93	91
1977/78	143	126	129
1978/79	151	140	141
1979/80	117	96	100
1980/81	117	87	93
1981/82	165	157	157
1982/83	69	68	68
1983/84	197	154	163
1984/85	101	98	98
1985/86	101	90	92
1986/87	121	115	115
1987/88	75	77	76
1988/89	75	55	59
1989/90	50	53	52
1990/91	91	46	56
1991/92	68	56	58

Продолжение таблицы 3.5

Год	Запас воды, общий		Суммарный запас воды
	поле	лес	
1992/93	59	47	49
1993/94	90	93	91
1994/95	100	86	89
1995/96	86	63	68
1997/98	107	79	85
1998/99	88	67	71
1999/00	55	40	43
2000/01	68	52	55
2001/02	99	63	71
2002/03	68	74	72
2003/04	87	73	76
2004/05	62	75	71
2005/06	83	77	78
2006/07	44	43	43
2007/08	59	59	58
2008/09	63	70	68
2009/10	170	173	171
2010/11	189	186	185
2011/12	85	62	67
2012/13	100	94	95
2013/14	20	18	18
2014/15	85	79	80
2015/16	27	25	25
2016/17	42	41	41
2017/18	50	49	49
2018/19	119	115	115

Продолжение таблицы 3.5

Год	Запас воды, общий		Суммарный запас воды
	поле	лес	
2019/20	6	6	6
S_{cp}	94	82	85
S_{max}	211	186	185
S_{min}	6	6	5.94
Cv	0.48	0.50	0.49

Связь максимальных запасов воды в снежном покрове в поле и лесу показана на рисунке 3.3.

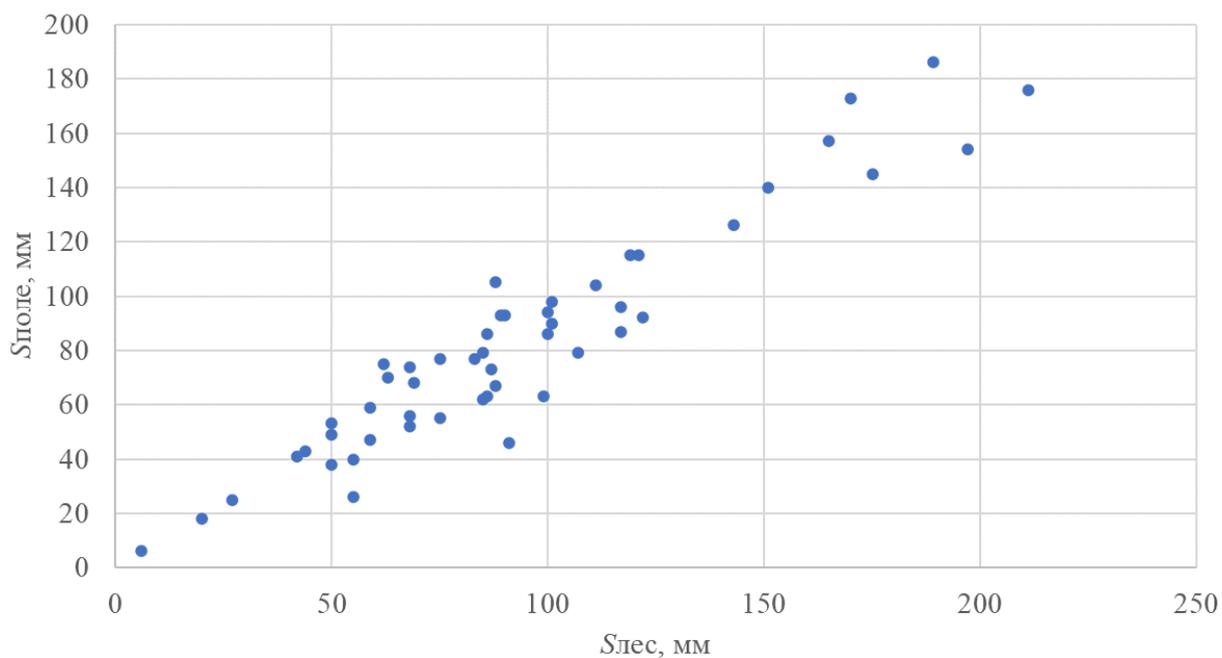


Рисунок 3.3 – Зависимость максимальных запасов воды в снежном покрове в лесу и в поле

4. Прогноз стока весеннего половодья

4.1 Прогноз стока весеннего половодья физико-статистическим методом

Физико-статистический метод прогноза стока весеннего половодья объединяет элементы физических закономерностей поведения водных масс и статистики исторических наблюдений.

Весеннее половодье возникает вследствие таяния снега и поступления талой воды в реки. Важнейшими факторами, влияющими на величину половодья, являются:

- Запасы влаги в снеговом покрове (его глубина и плотность);
- Температурный режим (скорость и равномерность потепления);
- Осадочный режим (количество дождей в течение периода таяния);
- Тип почв и влажность территорий, откуда поступает вода.

Физико-статистический метод основывается на историческом опыте наблюдений. Собираются данные о параметрах снегозапасов, температурах, осадках и уровне половодья прошлых лет. Затем устанавливаются статистические взаимосвязи между этими параметрами и величиной стока.

Основная проблема в гидрологии при прогнозировании – расчет объемов талой воды, поступающей в реки, потому что потеря воды различается в зависимости от местности и сезона. Потери зависят от особенностей распределения снега и свойств почв. Например, почва в полях сильнее промерзает в первые зимние месяцы, чем в лесах. Из-за этого избыток влаги остается ближе к поверхности и замерзает, тогда как в лесных районах вода проникает глубже благодаря крупнопористым верхним слоям почвы и меньшей глубине промерзания. Поэтому к концу зимы почва в поле оказывается перенасыщена влагой, а в лесу — напротив, приближается к состоянию минимальной влагоемкости.

Весной, когда земля оттаивает, эта избыточная вода формирует поверхностный сток и пополняет подземные воды. Исключением становятся случаи, когда осенью было недостаточно дождя, тогда влажность почвы в лесу и поле выравнивается.

Исследования показывают, что в областях, покрытых лесом, объемы испарения и пополнения грунтовых вод практически совпадают с открытыми участками, но различия в поглощении влаги почвой существенны из-за разной глубины промерзания и содержания влаги в почве.

Максимальную разницу в объеме талой воды можно наблюдать в годы, когда поля содержат большое количество замороженной влаги, а в лесах почвы оказываются наименее насыщенными. Зимние оттепели усиливают такое неравенство, иногда существенно повышая запас снега в лесу по сравнению с полем, вплоть до 40–70 мм. Иногда именно это становится причиной того, что весной поток талой воды с лесных участков превосходит потоки с открытых земель.

Для решения задачи прогнозирования в данной работе использовали специальную формулу, в которой ключевым индикатором емкости бассейна служил минимальный расход воды в октябре [20, 21]. Основными входящими данными стали величина талого стока, запас снега, осадки за весенний период и среднемесячные расходы воды в межень (октябрь) (таблица 4.1).

Таблица 4.1 — Исходные данные для выполнения проверочного прогноза физико-статистическим методом

Год	Исходные данные				$S+X_B$	P_0
	Y , мм	S , мм	X_B , мм	Q_x , м ² /с		
1966	233	183	163	5,66	346	136
1968	124	98	90,2	1,97	189	78,5
1971	212	33	111	0,62	144	-55,6
1976	113	151	95,0	1,00	246	191

Продолжение таблицы 4.1

Год	Исходные данные				$S+X_B$	P_0
	Y , мм	S , мм	X_B , мм	Q_x , м ² /с		
1977	117	91	93,3	4,45	184	83,7
1978	114	129	107	5,59	236	172
1979	134	141	62,6	2,22	204	85,2
1980	103	100	49,5	1,80	149	55,6
1981	111	93	39,7	3,60	133	23,7
1982	141	157	61,0	1,68	218	95,0
1983	113	68	89,7	0,77	158	52,6
1984	119	163	29,4	3,13	192	92,4
1985	117	98	56,2	5,56	154	42,5
1986	162	92	85,4	7,89	177	16,1
1987	149	115	70,7	4,12	186	40,9
1988	118	76	59,0	4,45	135	18,2
1989	116	59	132	1,02	191	95,0
1990	138	52	167	9,35	219	101
1991	149	56	135	0,81	191	47,2
1993	98,9	49	70,5	0,83	120	22,6
1994	100	91	79,7	3,83	171	91,3
1995	216	89	186	0,16	275	66,1
1996	88,5	68	91,9	0,18	160	94,6
1998	123	85	129	1,87	214	118
2000	92,0	43	102	2,56	145	65,6
2001	93,0	55	69,8	0,39	125	36,7
2002	91,1	71	156	0,086	227	208
2003	57,8	72	93,9	4,24	166	175
2004	130	76	58,2	5,50	134	4,2
2005	125	71	61,8	0,053	133	8,0

Продолжение таблицы 4.1

Год	Исходные данные				$S+X_B$	P_0
	Y , мм	S , мм	X_B , мм	Q_x , м ² /с		
2006	78,3	78	78,4	0,32	156	108
2007	54,0	43	61,2	0,22	104	68,5
2008	122	58	40,5	2,15	98,5	-21,1
2009	74,3	68	31,1	5,09	99,1	28,5
2010	178	171	60,6	1,16	232	61,0
2011	170	185	51,1	2,81	236	77,5
2012	95,9	67	71,0	2,84	138	50,2
2013	115	95	79,7	0,83	175	73,0
2014	58,7	18	35,6	1,20	53,6	-4,87
Среднее	121,7	89,9	84,7	2,62		

Расчет параметра P_0 производился по формуле [23]:

$$P_0 = -X \ln\left(\frac{Y}{X}\right), \quad (4.1)$$

где X – запасы воды, выраженные суммой снегозапасов и осадков за период весеннего половодья.

Для прогнозирования построена зависимость (рисунок 4.1).

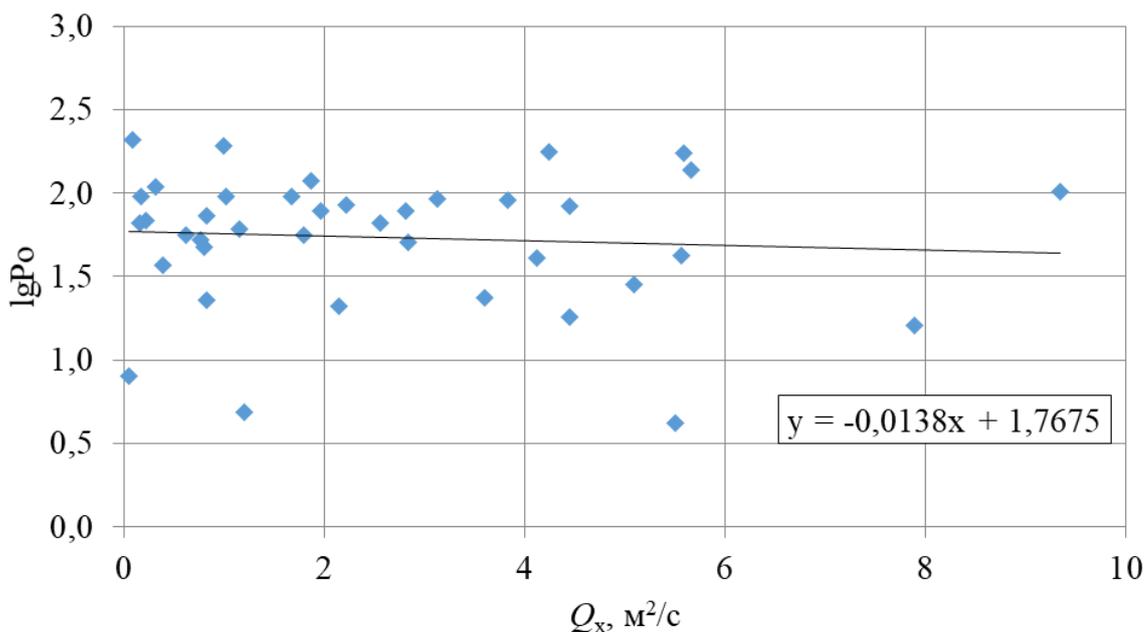


Рисунок 4.1 — Прогностическая зависимость

Результаты поверочных прогнозов на зависимом результате представлен в Приложение А.

В таблице 4.2 представлены результаты проверки эффективности методики. Хронологические графики фактического и прогнозных слоев стока половодья приведены на рисунке 4.2.

Таблица 4.2 — Результаты проверки методики на эффективность

№ прогноза	Вид зависимости	σ	S	S / σ	Эффективность
I	$Y = (S + X) - P_0 th \frac{S + X}{P'_0}$	40,4	41,9	1,04	Не эффективна
II	$Y = (S + X_{cp}) - P_0 th \frac{S + X_{cp}}{P'_0}$		44,0	1,09	Не эффективна

После проверки методики на зависимом материале переходим к прогнозу на независимом материале (Приложение А). Графики ряда слоя стока весеннего половодья фактического и прогнозных данных представлена на рисунке 4.3.

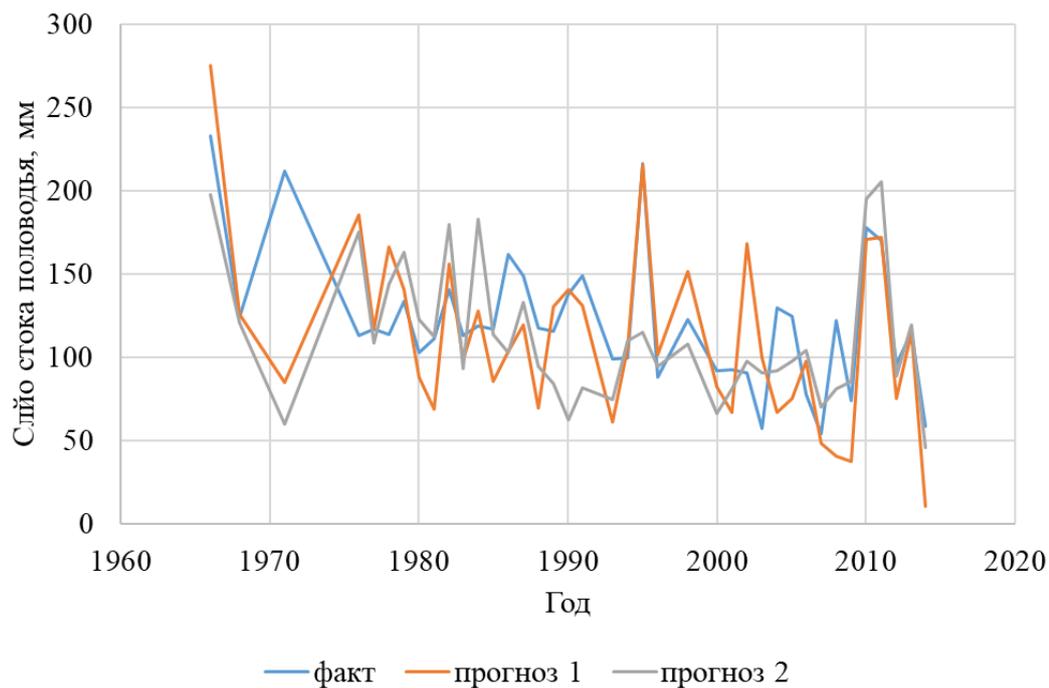


Рисунок 4.2 — Хронологические графики фактического и прогнозных слоев стока половодья

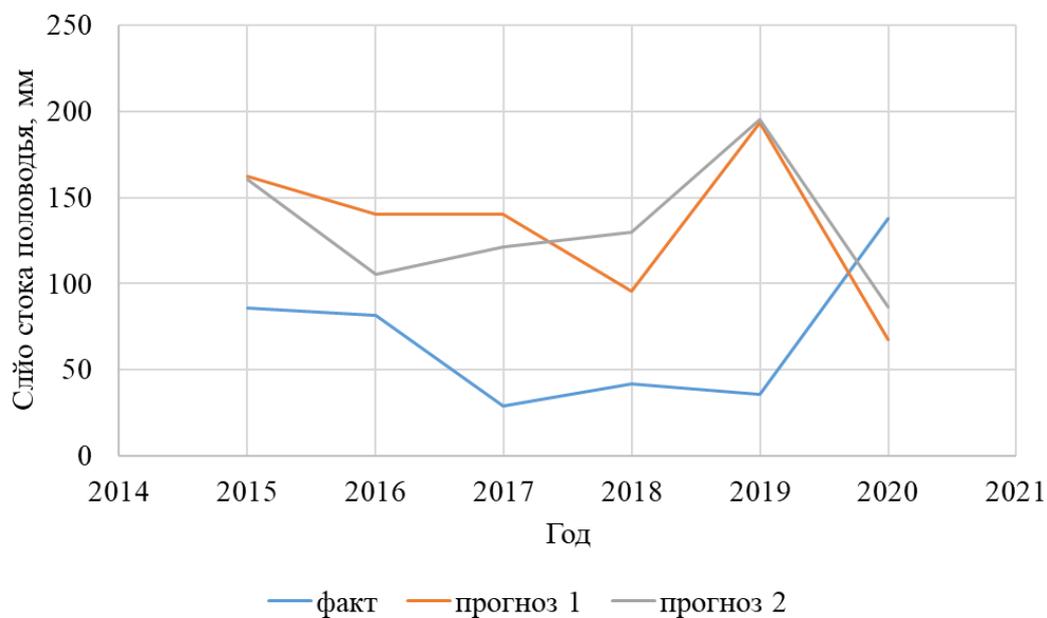


Рисунок 4.3 — Хронологические графики фактического и прогнозных слоев стока половодья, рассчитанных на независимом материале

4.2 Использование кластерного анализа

Кластерный анализ – это метод классификационного анализа; его основное назначение разбиение множества исследуемых объектов и признаков на однородность в некотором смысле группы, или кластеры.

Преимуществом кластерного анализа является обработка большого количества исходных данных и применением в различных областях. Кластерный анализ позволяет разбивать данные не по одному признаку, а по ряду признаков.

Задача кластерного анализа – на основе признаков разбить данных на множество m группы (кластеров) причем так, чтобы объект принадлежал только одной однородной группе.

При выполнении кластеризации в n -мерном пространстве однородность объектов определяется расстоянием между точками, чем меньше расстояние, тем наиболее схожи объекты.

В данной работе кластерный анализ выполнялся с помощью программы STATISTICA. Метрика в данной программе оценивается Евклидовым расстоянием. Данный метод является чувствительным к изменению единиц измерения, поэтому кластерный анализ выполняется по стандартизированным данным.

Алгоритмы кластерного анализа подразделяются на иерархические (древовидные) и неиерархические. Иерархические процедуры могут быть агломеративные (собирательные) и итеративные дивизиативные (разделительные) процедуры. Иерархические агломеративные процессы подразумевают последовательное объединение групп элементов сначала самых близких, а затем всё более отдаленных друг от друга. Иерархические дивизиативные процедуры работают наоборот. Эти процедуры основываются на матрицах расстояний. Недостаток данных процедур заключается в громоздкости предоставления результата.

Агломеративный алгоритм реализуется по следующему принципу: каждое наблюдение рассматривается как отдельный кластер; объединение двух самых близких кластеров; пересчет матрицы расстояний. Окончание алгоритма соответствует объединению всех классов в один.

В программе STATISTICA агломеративные методы представлены древовидной и двухвходовой кластеризацией, а также дивизионным методом k -средних.

Реализация метода k -средних начинается с m случайно выбранных кластеров, затем изменяется принадлежность к ним таким образом, чтобы минимизировать изменчивость внутри кластеров и увеличить изменчивость между ними. Далее следует случайное назначение центров кластеров в пространстве. После чего следует расчет расстояний между центрами кластеров и каждым объектом для того, чтобы определить объект ближайшему кластеру. Затем идет расчет средних значений переменных для каждого кластера. Количество средних равняется количеству переменных – k штук и представляет собой координаты нового положения центра кластера. Далее процесс повторяется до тех пор, пока центр не перестанет смещаться.

Одной из функций кластерного анализа является разделение выборки на группы однородности при этом отсутствуют правила и четкие критерии оценки качества кластеризации. Данные недостатки решает дискриминантный многомерный анализ. Цель дискриминантного анализа — классифицировать объект, основываясь на изменении различных характеристик. Одним из наилучших свойств методов дискриминантного анализа является возможность классифицировать данные, не отображённые в исходных.

В модуле дискриминантного анализа программы STATISTICA реализован широкий набор средств, обеспечивающих проведение анализа, визуализации и интерпретации результатов.

Метод k -средних

В программу STATISTICA были загружены следующие переменные: слой стока половодья, максимальные расходы воды, снеготпасы, осадки (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Исходные данные для проведения кластерного анализа

Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_X	S	X	Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_X	S	X
1966	233	5.66	183	163	1994	100	0.83	91	79.7
1968	124	1.97	98	90.2	1995	216	3.83	89	186
1971	212	0.62	33	111	1996	88.5	0.16	68	91.9
1976	113	1.00	151	95.0	1998	123	0.18	85	129
1977	117	4.45	91	93.3	2000	92.0	1.87	43	102
1978	114	5.59	129	107	2001	93.0	2.56	55	69.8
1979	134	2.22	141	62.6	2002	91.1	0.39	71	156
1980	103	1.80	100	49.5	2003	57.8	0.086	72	93.9
1981	111	3.60	93	39.7	2004	130	4.24	76	58.2
1982	141	1.68	157	61.0	2005	125	5.50	71	61.8
1983	113	0.77	68	89.7	2006	78.3	0.053	78	78.4
1984	119	3.13	163	29.4	2007	54.0	0.32	43	61.2
1985	117	5.56	98	56.2	2008	122	0.22	58	40.5
1986	162	7.89	92	85.4	2009	74.3	2.15	68	31.1
1987	149	4.12	115	70.7	2010	178	5.09	171	60.6
1988	118	4.45	76	59.0	2011	170	1.16	185	51.1
1989	118	1.02	59	132	2012	95.9	2.81	67	71.0
1990	116	9.35	52	167	2013	115	2.84	95	79.7
1991	138	0.81	56	135	2014	58.7	0.83	18	35.6

По стандартизированным данным построен график средних (рисунок 4.4), выбрав 2 кластера. Малое расстояние между переменными

говорит о том, что данные неинформативны для кластеризации. С помощью дисперсионного анализа определили вклад признаков в процессе кластеризации. Наименьшее значение внутригрупповой дисперсии (внутри SS) и наибольшее значение межгрупповой дисперсии (между SS) говорит о лучшем признаке, характеризующем принадлежность объектов к кластеру, о большем вкладе (рисунок 4.5).

Таким образом, снегозапасы несут наибольший вклад. Переменные несут вклад в процедуру кластеризации в следующем порядке: расход воды за межень, снегозапасы, осадки.

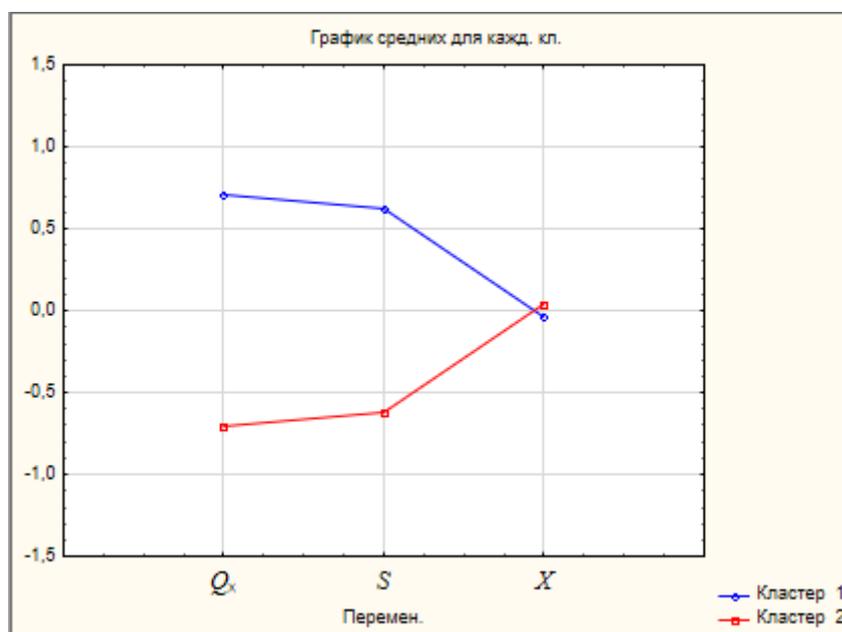


Рисунок 4.4 – График средних

перемен.	Дисперсионный анализ					
	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. p
Q_x	18,95869	1	18,04131	36	37,83058	0,000000
S	14,89025	1	22,10975	36	24,24491	0,000019
X	0,06172	1	36,93828	36	0,06015	0,807650

Рисунок 4.5 – Результат дисперсионного анализа

Лучшей кластеризации соответствуют большие значения параметра F и меньшие значения параметра p . Переменные со значением параметра p больше

0,05 можно исключить из процедуры кластеризации. В результате исключения осадков из процесса кластеризации был проведен повторный дисперсионный анализ (таблица 4.6).

перемен.	Дисперсионный анализ					
	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. р
Q_x	18,95869	1	18,04131	36	37,83058	0,000000
S	14,89025	1	22,10975	36	24,24491	0,000019

Рисунок 4.6 – Результат дисперсионного анализа после исключения осадков

Статистика для каждого кластера показывает основную статистику переменных для каждого кластера (рис. 4.7, 4.8).

перемен.	Описат. статистики для кластера 1 Кластер содержит 19 набл.		
	Среднее	Стандарт отклон.	Дисперс.
Q_x	0,706338	0,924108	0,853976
S	0,625978	0,985322	0,970860

Рисунок 4.7 – Описательная статистика для кластера 1

перемен.	Описат. статистики для кластера 2 Кластер содержит 19 набл.		
	Среднее	Стандарт отклон.	Дисперс.
Q_x	-0,706338	0,385122	0,148319
S	-0,625978	0,507405	0,257460

Рисунок 4.8 – Описательная статистика для кластера 2

На рисунках 4.9, 4.10 показаны расстояния от данного наблюдения до центра кластера.

		Элементы кластера номер 1 и расст. до центра кластера. Кластер содержит 19 набл.	
Наблюд.	объедин.		
C_1	1,186745		
C_4	1,155984		
C_5	0,446057		
C_6	0,447175		
C_7	0,748322		
C_9	0,459653		
C_10	1,041989		
C_12	0,848602		
C_13	0,509000		
C_14	1,185308		
C_15	0,062669		
C_16	0,698038		
C_18	1,904197		
C_21	0,496553		
C_28	0,696257		
C_29	0,865194		
C_34	0,939798		
C_35	1,490628		
C_37	0,580099		

Рисунок 4.9 – Элементы кластера 1 и расстояния до центра кластера

		Элементы кластера номер 2 и расст. до центра кластера. Кластер содержит 19 набл.	
Наблюд.	объедин.		
C_2	0,630941		
C_3	0,550399		
C_8	0,639931		
C_11	0,094759		
C_17	0,097679		
C_19	0,162103		
C_20	0,446156		
C_22	0,270237		
C_23	0,427952		
C_24	0,449947		
C_25	0,499104		
C_26	0,220701		
C_27	0,312120		
C_30	0,371767		
C_31	0,426216		
C_32	0,271686		
C_33	0,349520		
C_36	0,548895		
C_38	0,791599		

Рисунок 4.10 – Элементы кластера 2 и расстояния до центра кластера

Таким образом типичным элементом для кластера 1 является элемент C_15, для кластера 2 – C_11.

На рисунке 4.11 показаны евклидовы расстояния между кластерами и средние значения кластеров на рисунке 4.12.

Кластер Номер	Евклидовы расст. между кластерами Расстояния под диагональю		Квадраты расстояний над диагональю	
	Но. 1	Но. 2		
Но. 1	0,000000	1,781523		
Но. 2	1,334737	0,000000		

Рисунок 4.11 — Евклидовы расстояния между кластерами

перемен.	Средн.класт.	
	Кластер Но. 1	Кластер Но. 2
Q_x	0,706338	-0,706338
S	0,625978	-0,625978

Рисунок 4.12 — Средние кластеров

Результат кластерного анализа методом k -средних представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 — Результат кластерного анализа методом k -средних

№ С	Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_x	S	X	Кластер	Расстояние
1	1966	233	5,66	183	163	Группа 1	1,19
2	1968	124	1,97	98	90,2	Группа 2	0,63
3	1971	212	0,62	33	111	Группа 2	0,55
4	1976	113	1,00	151	95,0	Группа 1	1,16
5	1977	117	4,45	91	93,3	Группа 1	0,45
6	1978	114	5,59	129	107	Группа 1	0,45
7	1979	134	2,22	141	62,6	Группа 1	0,75
8	1980	103	1,80	100	49,5	Группа 2	0,64
9	1981	111	3,60	93	39,7	Группа 1	0,46
10	1982	141	1,68	157	61,0	Группа 1	1,04
11	1983	113	0,77	68	89,7	Группа 2	0,09
12	1984	119	3,13	163	29,4	Группа 1	0,85
13	1985	117	5,56	98	56,2	Группа 1	0,51
14	1986	162	7,89	92	85,4	Группа 1	1,19

Продолжение таблицы 4.4

№ С	Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_X	S	X	Кластер	Расстояние
15	1987	149	4,12	115	70,7	Группа 1	0,06
16	1988	118	4,45	76	59,0	Группа 1	0,70
17	1989	118	1,02	59	132	Группа 2	0,10
18	1990	116	9,35	52	167	Группа 1	1,90
19	1991	138	0,81	56	135	Группа 2	0,16
20	1994	100	0,83	91	79,7	Группа 2	0,45
21	1995	216	3,83	89	186	Группа 1	0,50
22	1996	88,5	0,16	68	91,9	Группа 2	0,27
23	1998	123	0,18	85	129	Группа 2	0,43
24	2000	92,0	1,87	43	102	Группа 2	0,45
25	2001	93,0	2,56	55	69,8	Группа 2	0,50
26	2002	91,1	0,39	71	156	Группа 2	0,22
27	2003	57,8	0,086	72	93,9	Группа 2	0,31
28	2004	130	4,24	76	58,2	Группа 1	0,70
29	2005	125	5,50	71	61,8	Группа 1	0,87
30	2006	78,3	0,053	78	78,4	Группа 2	0,37
31	2007	54,0	0,32	43	61,2	Группа 2	0,43
32	2008	122	0,22	58	40,5	Группа 2	0,27
33	2009	74,3	2,15	68	31,1	Группа 2	0,35
34	2010	178	5,09	171	60,6	Группа 1	0,94
35	2011	170	1,16	185	51,1	Группа 1	1,49
36	2012	95,9	2,81	67	71,0	Группа 2	0,55
37	2013	115	2,84	95	79,7	Группа 1	0,58
38	2014	58,7	0,83	18	35,6	Группа 2	0,79

Метод иерархической классификации

По данным была построена дендрограмма (рис. 4.13).

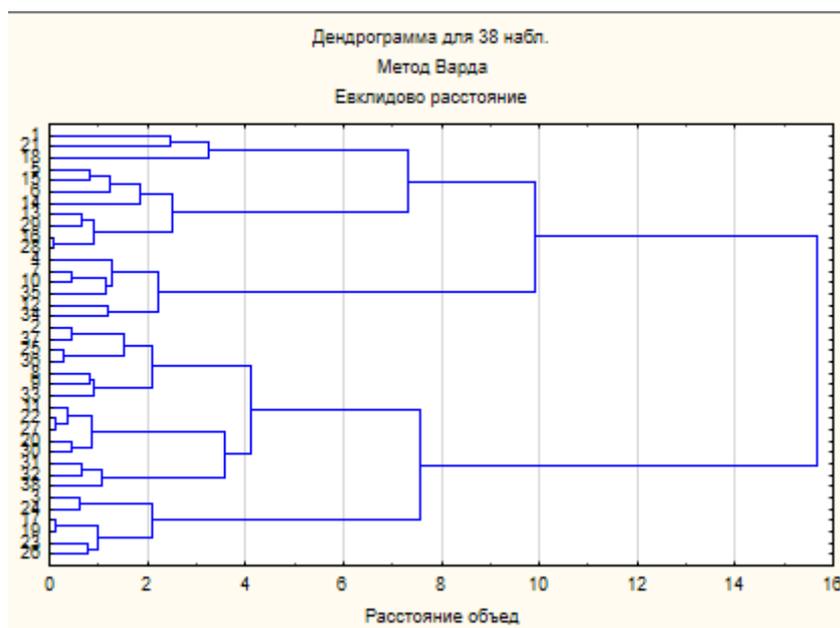


Рисунок 4.13 – Горизонтальная дендрограмма

Для более подробного анализа построена схема объединения (рис. 4.14).

расст. объедин.	Схема объединения (Таблица данных1) Метод Варда Евклидово расстояние					
	Объект 1	Объект 2	Объект 3	Объект 4	Объект 5	Объект 6
,0935800	16	28				
,1128273	22	27				
,1387302	17	19				
,3076544	25	36				
,3621822	11	22	27			
,4496586	7	10				
,4591922	20	30				
,4678187	2	37				
,6381811	3	24				
,6395791	31	32				
,6602885	13	29				
,7799370	23	26				
,8233932	5	15				
,8357587	8	9				
,8518364	11	22	27	20	30	
,8912449	13	29	16	28		
,9231685	8	9	33			
,9872290	17	19	23	26		
1,059303	31	32	38			
1,137805	7	10	35			

Рисунок 4.14 – Фрагмент схемы объединения

По схеме объединения построен график (рис. 4.15). По вертикальной оси – значения расстояний, по горизонтальной – шаги процедуры объединения.

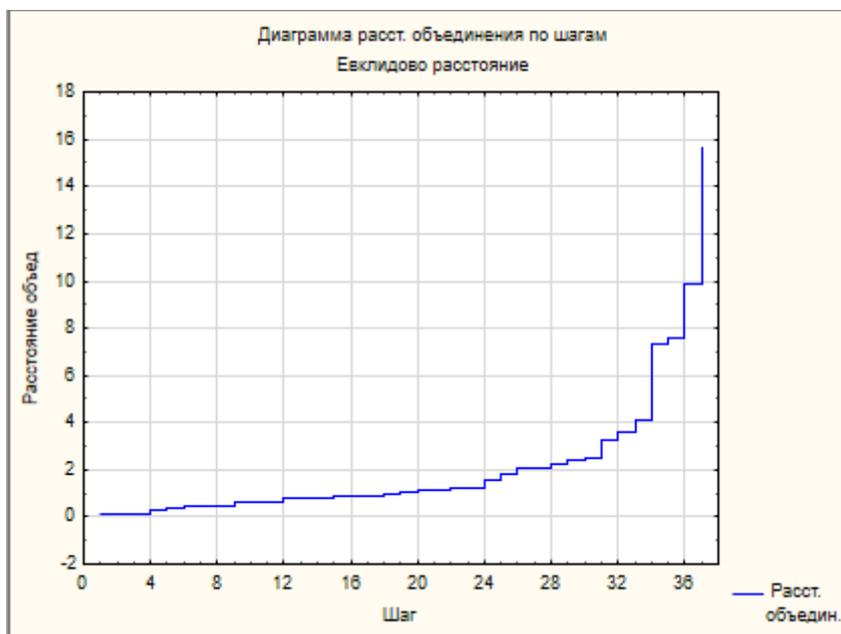


Рисунок 4.15 – Схема объединения

Дискриминантный анализ

Данные, разделенные на группы путем кластеризации, используются в дискриминантном анализе. По лямбде Уилкса, равной 0,249, можно сказать, что дискриминация прошла успешно (рис. 4.16).

Число переменных в модели: 3
 Лямбда Уилкса: ,2489893 пригл. F (3,34) = 34,18402 p < ,0000

Рисунок 4.16 — Результаты анализа дискриминантных функций

Для оценки участия каждого показателя произведен расчет переменных в модели, результат которого представлен на рисунке 4.17.

Итоги анализа дискриминантн. функций						
Переменных в модели: 3; Группир.: Кластер (2 гр.)						
Лямбда Уилкса: ,24899 пригл. F (3,34)=34,184 p< ,0000						
N=38	Уилкса Лямбда	Частная Лямбда	F-исключ (1,34)	p-уров.	Толер.	1-толер. (R-кв.)
Q_x	0,597262	0,416885	47,55732	0,000000	0,789277	0,210723
S	0,468873	0,531038	30,02556	0,000004	0,828049	0,171951
X	0,254830	0,977078	0,79761	0,378086	0,946149	0,053851

Рисунок 4.17 — Итоги анализа дискриминантных функций

Результат показал, что меженные расходы воды играют наиважнейшую роль в процессе дискриминации, а также вносят большой вклад в разделительную функцию модели. По уровню значимости критерия Фишера (*p-уров.*) можно исключить переменные, превышающие значение 0,05, такой переменной в данном случае является осадки. Результат анализа дискриминантных функций после исключения данных переменных приведен на рисунке 4.18.

Итоги анализа дискриминантн. функций						
Переменных в модели: 2; Группир.: Кластер (2 гр.)						
Лямбда Уилкса: ,25483 пригл. F (2,35)=51,173 p< ,0000						
N=38	Уилкса Лямбда	Частная Лямбда	F-исключ (1,35)	p-уров.	Толер.	1-толер. (R-кв.)
Q_x	0,597561	0,426451	47,07275	0,000000	0,828179	0,171821
S	0,487603	0,522619	31,97042	0,000002	0,828179	0,171821

Рисунок 4.18 — Итоги анализа дискриминантных функций после исключения не значимых переменных

На рисунке 4.19 приведены квадраты расстояний Махолонобиса между центрами групп.

Кластер	p-уров.	
	Группа 1	Группа 2
Группа 1		0,000000
Группа 2	0,000000	

Рисунок 4.19 — Квадраты расстояний Махолонобиса между центрами групп

По результаты канонического анализа по критерию Хи-квадрата последовательных корней видно, что переменная значима, так как показатель *p*-уров. равна нулю (рис. 4.20).

Корни исключенные	Критерий хи-квадрат с послед. исключ. корнями					
	Собств. знач.	Канонич. R	Уилкса Лямбда	Хи-квад.	ст. св.	<i>p</i> -уров.
0	2,924179	0,863232	0,254830	47,85050	2	0,000000

Рисунок 4.20 — Результат канонического анализа по критерию Хи-квадрата последовательных корней

По исходным коэффициентам канонических переменных (рис. 4.21) могут вычисляться значения дискриминантных функций для каждого наблюдения. Величину вклада и направление вкладов переменных можно оценивать по стандартизированным коэффициентам (рис. 4.22).

Переменная	Исходные коэффициенты для канонич. переменных		
	Кор. 1		
Q_x	-1,36180		
S	-1,12228		
Конст-та	-0,00000		
Соб. зн.	2,92418		
Кум.доля	1,00000		

Рисунок 4.21 — Исходные коэффициенты для канонических переменных

Переменная	Стандартиз. коэффициенты для канонич. переменных		
	Кор. 1		
Q_x	-0,964041		
S	-0,879514		
Соб. зн.	2,924179		
Кум.доля	1,000000		

Рисунок 4.22 — Стандартизированные коэффициенты для канонических переменных

Дискриминирующая мощность функции составляет 100%, что соответствует большей важности при разделении на группы.

Взаимосвязь переменных и дискриминирующей функции можно оценить по факторной структуре (рис. 4.23). Структурные (внутригрупповые) корреляции обозначают вклад каждой переменной в функцию.

		Матрица факторной структуры Корр. переменных и функции дискрим. (объединенные внутригруп. корреляции)			
Переменная	Кор. 1				
Q_x	-0,599471				
S	-0,479907				

Рисунок 4.23 — Матрица факторной структуры

По различию средних канонических переменных (рис. 4.24) дискриминантной функцией можно сделать вывод, что все группы успешно идентифицируются данной дискриминантной функцией, но наиболее успешно группа 2.

		Средние канонич. переменных			
Группа	Кор. 1				
Группа 1	-1,66441				
Группа 2	1,66441				

Рисунок 4.24 — Средние канонические переменные

На рисунке 4.25 представлена функция классификации с коэффициентами классификационной функции.

		Функции классификации; группировка: Кластер			
Переменная	Группа 1 $r=,50000$	Группа 2 $r=,50000$			
Q_x	2,26660	-2,26660			
S	1,86794	-1,86794			
Конст-та	-2,07828	-2,07828			

Рисунок 4.25 — Коэффициенты классификационных функций

Таким образом классификационные уравнения для групп выглядят следующим образом:

$$\text{группа 1} = -2,07828 + 2,2666Q_x + 1,86794S;$$

$$\text{группа 2} = -2,07828 - 2,2666Q_x - 1,86794S.$$

Для оценки ошибочных классификаций проведенной дискриминации построена матрица классификаций (рис. 4.26). Из матрицы видно, что классификация выполнена верна для 100% случаев.

Матрица классификации			
Строки: наблюдаемые классы			
Столбцы: предсказанные классы			
Группа	Процент правиль.	Группа 1 p=,50000	Группа 2 p=,50000
Группа 1	100,0000	19	0
Группа 2	100,0000	0	19
Всего	100,0000	19	19

Рисунок 4.26 — Матрица классификации

По таблице 4.5 оценивается расстояние каждого наблюдения до центра группы.

Таблица 4.5 — Квадраты расстояний Мехаланобиса

№ п/п	Наблюд. (Класс.)	группа 1 (p=0,5)	группа 2 (p=0,5)
1	Группа 1	7,38656	35,60237
2	Группа 2	3,66746	2,22653
3	Группа 2	19,77889	1,44424
4	Группа 1	4,08554	8,28006
5	Группа 1	0,70241	7,76158
6	Группа 1	1,21533	19,52957
7	Группа 1	1,64273	8,84995
8	Группа 2	3,92326	2,17066
9	Группа 1	1,17843	5,25310
10	Группа 1	2,90367	10,84062
11	Группа 2	11,53117	0,02547

Продолжение таблицы 4.5

№ п/п	Наблюд. (Класс.)	группа 1 ($p=0,5$)	группа 2 ($p=0,5$)
12	Группа 1	1,95876	16,66473
13	Группа 1	0,69539	13,36543
14	Группа 1	4,90802	25,66683
15	Группа 1	0,02448	10,06496
16	Группа 1	1,78899	6,17416
17	Группа 2	12,16536	0,03791
18	Группа 1	10,22498	29,59183
19	Группа 2	13,62985	0,14217
20	Группа 2	7,86082	0,69111
21	Группа 1	1,22503	5,49068
22	Группа 2	14,20094	0,29756
23	Группа 2	11,25546	0,46122
24	Группа 2	12,15025	0,51156
25	Группа 2	7,68284	0,89550
24	Группа 2	12,61608	0,15154
25	Группа 2	13,81132	0,33014
26	Группа 1	1,93875	5,49849
27	Группа 1	2,01544	9,63644
28	Группа 2	12,92394	0,38265
29	Группа 2	18,77287	1,04171
30	Группа 2	15,89611	0,44589
31	Группа 2	6,73500	0,65358
32	Группа 1	4,33756	28,17371
33	Группа 1	5,60227	16,48678
34	Группа 2	5,18978	1,52430
35	Группа 1	2,09572	3,53964
36	Группа 2	22,81940	2,63618

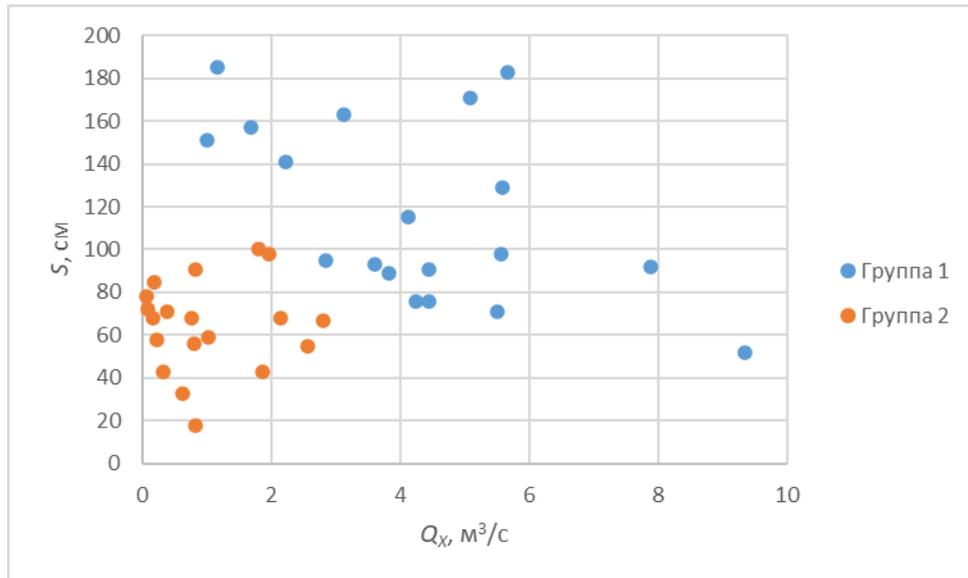


Рисунок 4.27 — График распределения данных на группы

Интервалы для групп в следствие кластерного анализа были определены следующими:

Группа 1 — $Q_x [1;9,35]$ $S [52, 185]$;

Группа 2 — $Q_x [0,053;2,81]$ $S [18, 100]$.

На основе кластерного анализа и выделенных интервалов переменных были определены группы для лет, относящихся к независимому материалу (табл. 4.6).

Таблица 4.6 — Определение кластеров на основе выделенных интервалов

№ п/п	Год	Q_x	S	Кластер
1	2015	1,20	80	Группа 2
2	2016	4,01	25	Группа 1
3	2017	6,39	41	Группа 1
4	2018	4,77	49	Группа 1
5	2019	0,73	115	Группа 2
6	2020	0,65	6	Группа 2

5. Прогноз слоя стока

Для каждой группы были определены прогностические уравнения:

$$\text{Группа 1: } Y = -3,24Q_x + 1,64S - 0,03X + 38,87;$$

$$\text{Группа 2: } Y = 72,87Q_x - 1,49S - 0,90X + 260,13.$$

По данным прогностическим уравнениям были выполнены прогнозы слоя стока с оценкой эффективности на зависимом материале для каждой группы (табл. 5.1 и 5.2).

Таблица 5.1 — Прогноз слоя стока весеннего половодья р. Тосна – г. Тосно для группы 1 на зависимом материале

Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_x	S	X	$Y_{\text{пр}}$	δ	δ^2	$(Y_{\text{фи}} - Y_{\text{ср}})^2$	Оправды- ваемость
1966	233	5,66	183	163	316	-83	6891	327,8	+
1976	113	1,00	151	95,0	281	-168	28059	10382,5	-
1977	117	4,45	91	93,3	171	-54	2922	9583,4	+
1978	114	5,59	129	107	229	-115	13283	10179,8	+
1979	134	2,22	141	62,6	261	-127	16139	6544,0	-
1981	111	3,60	93	39,7	179	-68	4560	10794,1	+
1982	141	1,68	157	61,0	289	-148	21919	5460,4	-
1984	119	3,13	163	29,4	295	-176	30988	9195,8	-
1985	117	5,56	98	56,2	180	-63	3959	9583,4	+
1986	162	7,89	92	85,4	162	0	0	2797,9	+
1987	149	4,12	115	70,7	212	-63	3976	4342,1	+
1988	118	4,45	76	59,0	147	-29	864	9388,6	+
1990	116	9,35	52	167	89	27	714	9780,2	+
1995	216	3,83	89	186	167	49	2372	1,2	+
2004	130	4,24	76	58,2	148	-18	327	7207,1	+

Продолжение таблицы 5.1

2005	125	5,50	71	61,8	136	-11	115	8081,1	+
2010	635	5,09	171	60,6	301	334	111591	176488,4	-
2011	599	1,16	185	51,1	337	262	68704	147536,9	-
2013	634	2,84	95	79,7	183	451	203230	175649,2	-
Ср.	214,9						Сумма	613323,8	63%

На графике 5.1 представлено соотношение фактических и прогнозных слоев стока для группы 1.

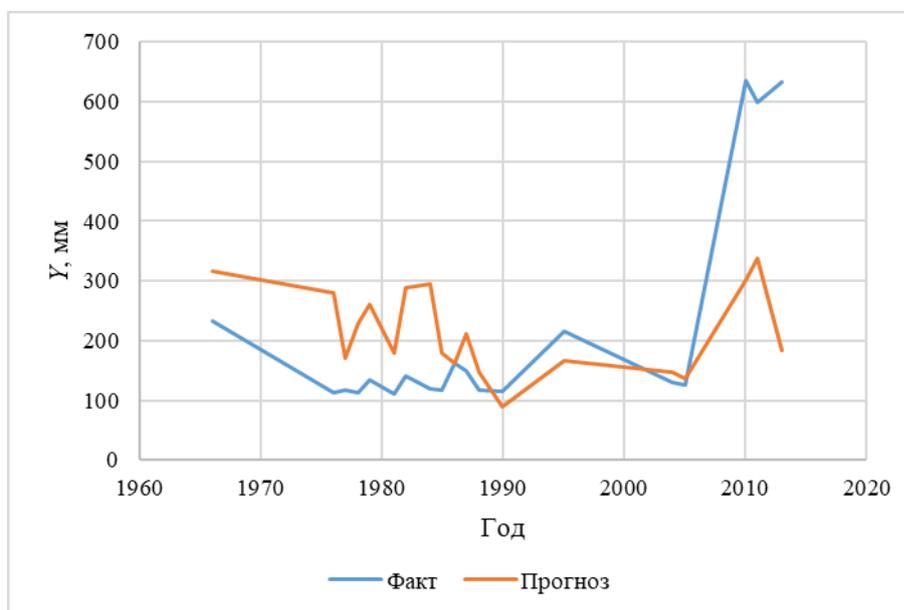


Рисунок 5.1 — График соотношений фактических и прогнозных слоев стока весеннего половодья на р. Тосна г. Тосно для группы 1 на зависимом материале

Таблица 5.2 — Прогноз слоя стока весеннего половодья р. Тосна – г. Тосно для группы 2 на зависимом материале

Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_x	S	X	$Y_{\text{пр}}$	δ	δ^2	$(Y_{\text{фи}} - Y_{\text{ср}})^2$	Оправды- ваемость
1968	124	1,97	98	90,2	176	-52	2731	1302,5	+

Продолжение таблицы 5.2

Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_x	S	X	$Y_{\text{пр}}$	δ	δ^2	$(Y_{\text{фи}}-Y_{\text{сп}})^2$	Оправды- ваемость
1971	212	0,62	33	111	156	56	3111	2694,7	+
1980	103	1,80	100	49,5	197	-94	8927	3259,2	-
1983	113	0,77	68	89,7	134	-21	445	2217,4	+
1989	118	1,02	59	132	128	-10	98	1771,5	+
1991	138	0,81	56	135	114	24	558	487,9	+
1994	100	0,83	91	79,7	113	-13	171	3610,7	+
1996	88,5	0,16	68	91,9	88	1	1	5125,1	+
1998	123	0,18	85	129	31	92	8525	1375,6	-
2000	92,0	1,87	43	102	241	-149	22133	4636,2	-
2001	93,0	2,56	55	69,8	302	-209	43605	4501,0	-
2002	91,1	0,39	71	156	42	49	2388	4759,5	+
2003	57,8	0,086	72	93,9	74	-17	279	10463,1	+
2006	78,3	0,053	78	78,4	77	1	1	6689,5	+
2007	54,0	0,32	43	61,2	164	-110	12153	11255,0	-
2008	122	0,22	58	40,5	153	-31	972	1450,8	+
2009	481	2,15	68	31,1	287	194	37511	102983,6	-
2012	513	2,81	67	71,0	301	212	44931	124545,8	-
2014	340	0,83	18	35,6	262	78	6124	32367,8	+
Ср.	160,1						Сумма	325497	63%

Рисунок 5.2 показывает наглядное соотношение фактических и прогнозных значений для группы 2.

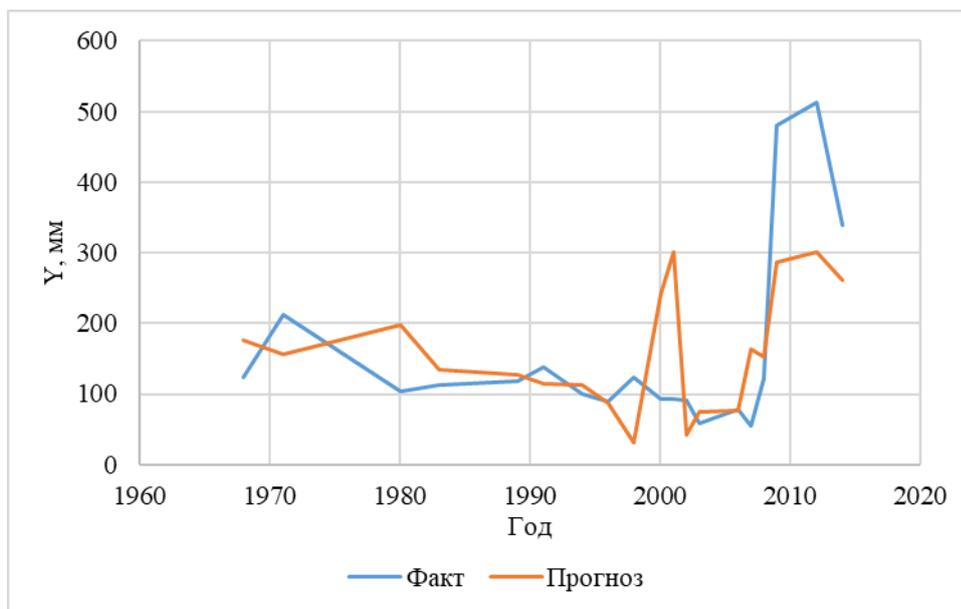


Рисунок 5.2 — График соотношений фактических и прогнозных слоев стока весеннего половодья на р. Тсна г. Тосно для группы 2 на зависимом материале

Оценка эффективности результатов рассчитанных значений по прогнозным уравнениям представлена в таблице 5.3.

Таблица 5.3 — Оценка эффективности методики прогнозных уравнений на зависимом материале

Кластер	σ	S	S/σ	Оценка эффективности
Группа 1	184,6	175,0	0,95	Не эффективна
Группа 2	134,5	107,0	0,80	Не эффективна

На независимом материале также выполнен прогноз по уравнениям, результат которого представлен в таблицах 5.3 и 5.4, графически представлено на рисунках 5.3 и 5.4.

Таблица 5.3 — Прогноз слоя стока весеннего половодья р. Тосна – г. Тосно для группы 1 на независимом материале

Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_x	S	X	$Y_{\text{пр}}$	δ	δ^2	$(Y_{\text{фи}}-Y_{\text{ср}})^2$	Оправды- ваемость
2016	422	4,01	25	139,35	63	359	128819	4489	-
2017	449	6,39	41	122,9	82	367	134665	1600	-
2018	596	4,77	49	70,55	102	494	244232	11449	-
Ср.	489						Сумма	17538	

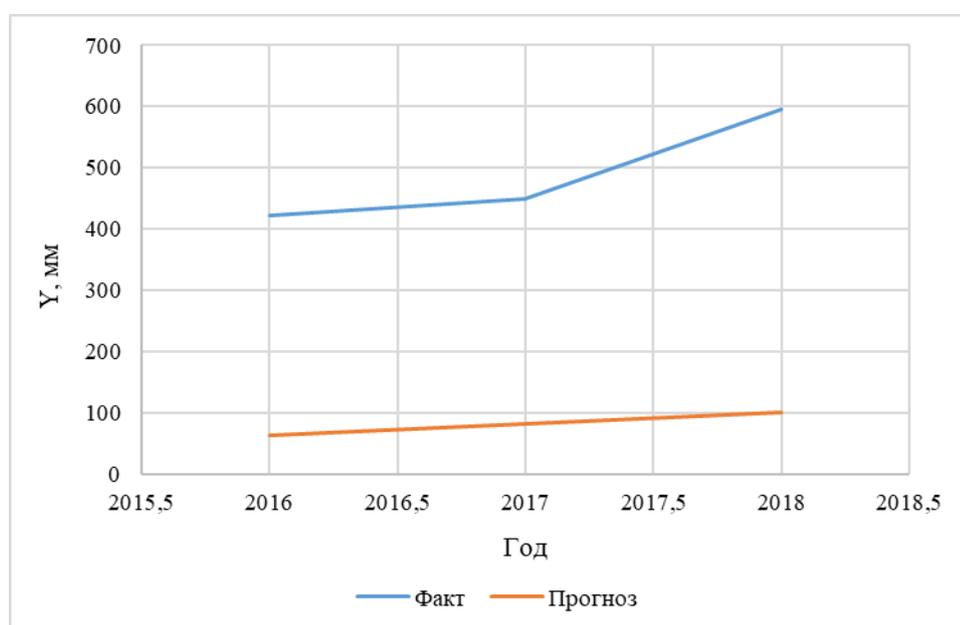


Рисунок 5.3 — График соотношений фактических и прогнозных слоев стока весеннего половодья на р. Тосна г. Тосно для группы 1 на независимом материале

Таблица 5.4 — Прогноз слоя стока весеннего половодья р. Тосна – г. Тосно для группы 2 на независимом материале

Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_x	S	X	$Y_{\text{пр}}$	δ	δ^2	$(Y_{\text{фи}}-Y_{\text{ср}})^2$	Оправды- ваемость
2015	429	1,20	80	106,2	133	296	87808	2844	-
2019	548	0,73	115	101,8	50	498	247915	4312	-

Продолжение таблицы 5.4

Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_x	S	X	$Y_{\text{пр}}$	δ	δ^2	$(Y_{\text{фи}} - Y_{\text{ср}})^2$	Оправды- ваемость
2020	470	0,65	6	85,15	222	248	61476	152	-
Ср.	482,3						Сумма	7309	

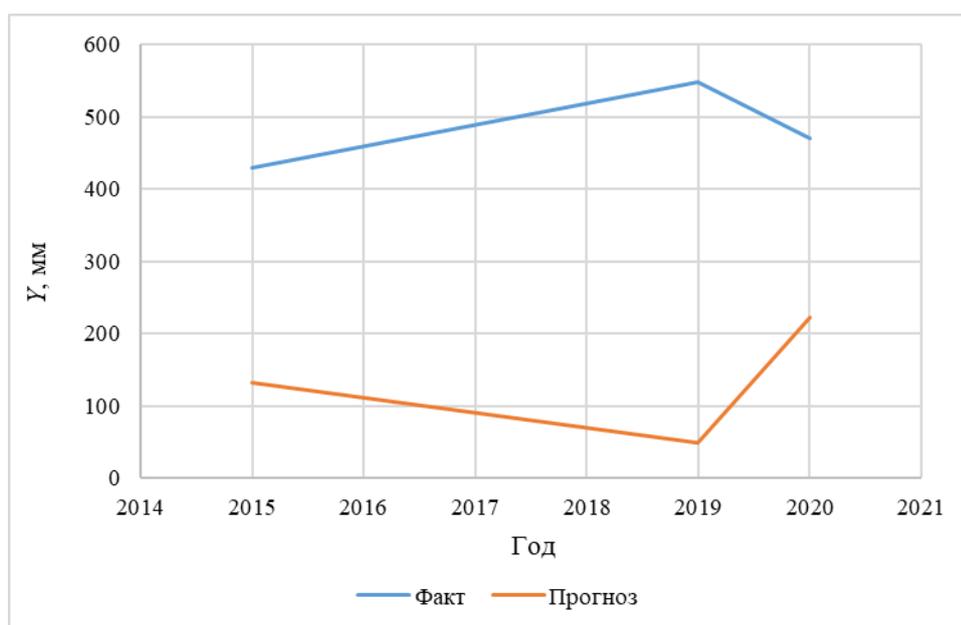


Рисунок 5.4 — График соотношений фактических и прогнозных слоев стока весеннего половодья на р. Тосна г. Тосно для группы 2 на независимом материале

Таблица 5.3 — Оценка эффективности методики прогнозных уравнений на независимом материале

Кластер	σ	S	S/σ	Оценка эффективности
Группа 1	184,6	712,5	3,86	Не эффективна
Группа 2	134,5	630,2	4,69	Не эффективна

6. Прогноз максимальных расходов воды

Водный режим реки Тосна характеризуется большой амплитудой колебания максимальных расходов воды (рисунок 6.1). За время половодья расход обычно достигает наибольшего годового значения и в несколько раз превышает средний годовой. Иногда бурное таяние большого количества накопившегося за зиму снега при незначительной впитывающей способности почв приводит к формированию катастрофически высокого половодья. Таким выдающимся половодьем было половодье в 1966 году, когда максимальный расход составил $206 \text{ м}^3/\text{с}$ [28].

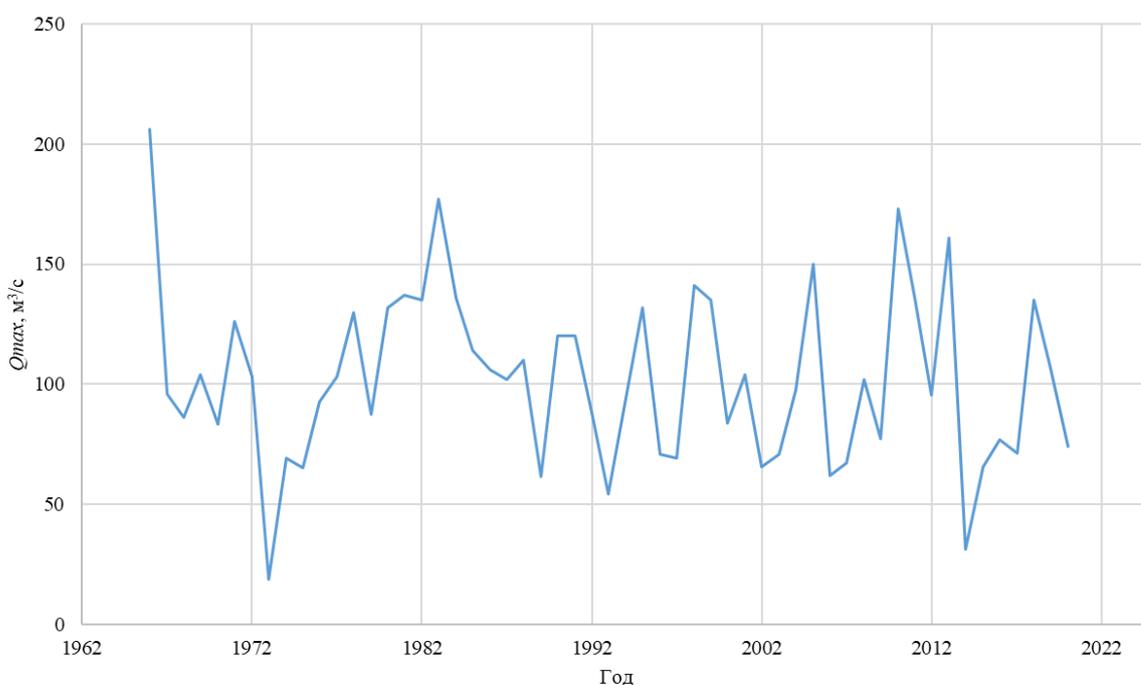


Рисунок 6.1 — График максимальных расходов воды на р. Тосна – г. Тосно

Для разработки методики прогнозирования максимальных расходов была использована их графическая зависимость от прогнозного слоя стока за период половодья за период с 1966 по 2014 год, представленная на рисунке 6.2. Результаты прогнозов представлены в таблицах 6.1, 6.2. Оценка

погрешностей прогнозов выполнена для двух вариантов – по фактическим и ожидаемым значениям слоя стока половодья и приведена в таблице 6.3.

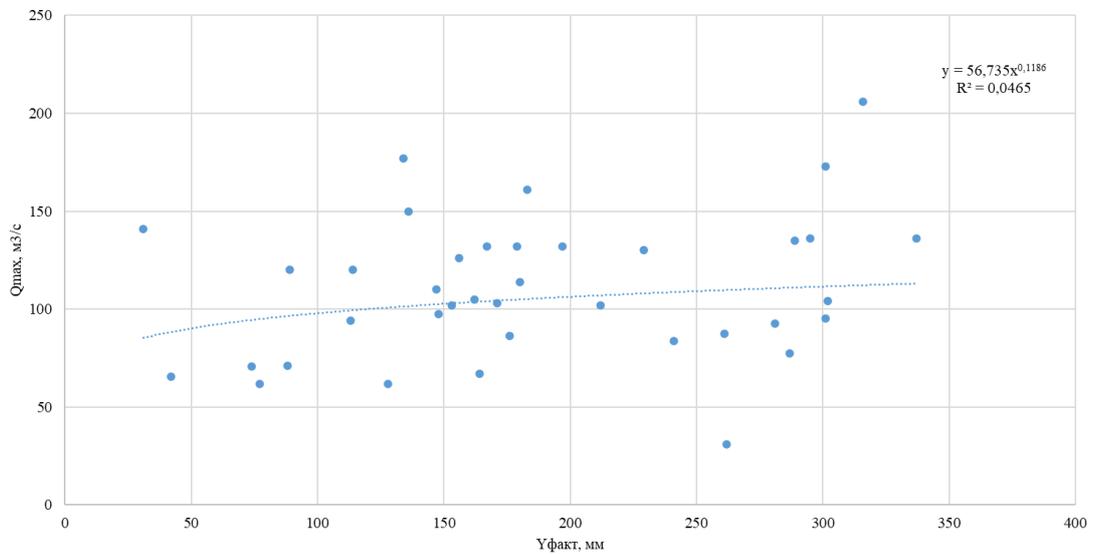


Рисунок 6.2 — Зависимость $Q_{max} = f(Y_{факт})$

Таблица 6.1 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Q_{max}=f(Y_{факт})$ на зависимом материале с фактическими слоями стока

Год	Q_{max}	$Y_{факт}$	Q_{max} прогн.	δ	δ^2	$(Q_{maxi}-Q_{max\text{ ср}})^2$	Оправд.
1966	206	233	108	98	9546	9163	0
1968	86,4	124	100	-14	199	570	1
1971	126	212	107	19	358	247	1
1976	92,5	113	99	-7	47	316	1
1977	103	171	104	-1	2	53	1
1978	130	229	108	22	481	389	1
1979	87,3	134	101	-14	199	528	1
1980	132	103	98	34	1135	472	0
1981	132	179	105	27	731	472	1
1982	135	141	102	33	1087	611	0
1983	177	113	99	78	6023	4452	0

Продолжение таблицы 6.1

Год	Q_{max}	$Y_{факт}$	Q_{max} прогн.	δ	δ^2	$(Q_{maxi}-Q_{max\text{ ср}})^2$	Оправд.
1984	136	119	100	36	1296	662	0
1985	114	117	100	14	202	14	1
1986	105	162	104	1	2	28	1
1987	102	149	103	-1	0	69	1
1988	110	147	103	7	56	0	1
1989	61,7	128	101	-39	1534	2360	1
1990	120	89	97	23	547	94	1
1991	120	114	99	21	420	94	1
1994	94,3	100	98	-4	13	255	1
1995	132	216	107	25	609	472	1
1996	71	88,5	97	-26	653	1543	1
1998	141	123	100	41	1649	944	0
2000	83,9	92,0	97	-13	172	696	1
2001	104	93,0	97	7	47	39	1
2002	65,6	91,1	97	-31	979	1996	1
2003	70,8	57,8	92	-21	441	1559	1
2004	97,4	130	101	-4	13	166	1
2005	150	125	101	49	2442	1578	0
2006	61,8	78,3	95	-33	1113	2350	1
2007	67,1	54,0	91	-24	574	1864	1
2008	102	122	100	2	3	69	1
2009	77,3	74,3	95	-17	298	1088	1
2010	173	178	105	68	4638	3934	0
2011	136	337	113	23	522	662	1
2012	95,4	301	112	-16	264	221	1
2013	161	183	105	56	3109	2573	0

Продолжение таблицы 6.1

Год	Q_{max}	$Y_{факт}$	Q_{max} прогн.	δ	δ^2	$(Q_{maxi}-Q_{max\text{ ср}})^2$	Оправд.
2014	31,1	262	110	-79	6196	6269	1
Ср.	110,3			Сумма	47599	48870	29

Таблица 6.2 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Q_{max}=f(Y_{\text{прогноз}})$ на зависимом материале с использованием спрогнозированных слоев стока половодья

Год	Q_{max}	$Y_{\text{прогноз}}$	Q_{max} прогн.	δ	δ^2	$(Q_{maxi}-Q_{max\text{ ср}})^2$	Оправд.
1966	206	316	112	204	41501	9163	0
1968	86,4	176	105	71	5076	570	0
1971	126	156	103	53	2781	247	0
1976	92,5	281	111	170	28992	316	0
1977	103	171	104	67	4436	53	0
1978	130	229	108	121	14623	389	0
1979	87,3	261	110	151	22872	528	0
1980	132	197	106	91	8251	472	0
1981	132	179	105	74	5481	472	0
1982	135	289	111	178	31648	611	0
1983	177	134	101	33	1061	4452	0
1984	136	295	111	184	33720	662	0
1985	114	180	105	75	5620	14	0
1986	105	162	104	58	3396	28	0
1987	102	212	107	105	11006	69	0
1988	110	147	103	44	1977	0	0
1989	61,7	128	101	27	736	2360	0
1990	120	89	97	-8	58	94	1

Продолжение таблицы 6.2

Год	Q_{max}	$Y_{\text{прогноз}}$	Q_{max} прогн.	δ	δ^2	$(Q_{maxi} - Q_{max \text{ ср}})^2$	Оправд.
1991	120	114	99	15	210	94	1
1994	94,3	113	99	14	185	255	1
1995	132	167	104	63	3956	472	0
1996	71	88	96	-8	72	1543	1
1998	141	31	85	-54	2944	944	1
2000	83,9	241	109	132	17495	696	0
2001	104	302	112	190	36221	39	0
2002	65,6	42	88	-46	2151	1996	1
2003	70,8	74	95	-21	421	1559	1
2004	97,4	148	103	45	2059	166	0
2005	150	136	102	34	1183	1578	0
2006	61,8	77	95	-18	323	2350	1
2007	67,1	164	104	60	3614	1864	0
2008	102	153	103	50	2497	69	0
2009	77,3	287	111	176	30973	1088	0
2010	173	301	112	189	35858	3934	0
2011	136	337	113	224	50112	662	0
2012	95,4	301	112	189	35858	221	0
2013	161	183	105	78	6047	2573	0
2014	31,1	262	110	152	23160	6269	0
Ср.	110,3	187		Сумма	478576	39145	8

Таблица 6.3 — Оценка методики прогноза максимальных расходов весеннего половодья на зависимом материале

Вид зависимости	S/σ	P, %	Эффективность методики
$Q_{max}=56,7(Y)^{0,1186}$ (при фактических данных)	0,99	91	Не эффективна
$Q_{max}=56,7(Y)^{0,1186}$ (при спрогнозированных данных)	3,50	25	Не эффективна

В таблицах 6.4 и 6.5 представлены результаты поверочных прогнозов максимального расхода воды весеннего половодья на независимом материале.

В таблице 6.6 приведена сводная информация о проверке методики на независимом материале.

Таблица 6.4 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Q_{max}=f(Y_{факт})$ на независимом материале с фактическими слоями стока

Год	Q_{max}	$Y_{факт}$	Q_{max} прогн.	δ	δ^2	$(Q_{maxi}-Q_{max\text{ ср}})^2$	Оправд.
2015	65,6	85,9	96	-31	937	515	-
2016	76,8	81,5	96	-19	354	132	+
2017	71,2	28,8	85	-13	177	292	+
2018	135	42,1	88	47	2171	2181	-
2019	107	35,8	87	20	411	350	+
2020	74,2	137,6	102	-28	758	199	+
Ср.	88,3			Сумма	4809	3669	4

Таблица 6.5 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Q_{max}=f(Y_{факт})$ на независимом материале с прогнозными слоями стока

Год	Q_{max}	$Y_{\text{прогноз}}$	Q_{max} прогн.	δ	δ^2	$(Q_{maxi}-Q_{max\text{ ср}})^2$	Оправд.
2015	65,6	133	101	-36	1277	515	-
2016	76,8	63	93	-16	254	132	+
2017	71,2	82	96	-24	599	292	+
2018	135	102	98	37	1355	2181	-
2019	107	50	90	17	281	350	+
2020	74,2	222	108	-33	1121	199	-
Ср.	88,3	66,6		Сумма	4887	3669	3

Таблица 6.6 — Прогностические зависимости для максимального расхода воды весеннего половодья

Вид зависимости	S/σ	P, %	Эффективность методики
$Q_{max}=56,7(Y)^{0,1186}$ (при фактических данных)	0,54	40	Эффективна
$Q_{max}=56,7(Y)^{0,1186}$ (при спрогнозированных данных)	0,55	30	Эффективна

По прогнозным значениям были построены кривые $Q_{max} = f(Y)$ по прогнозным значениям для каждого кластера (рис. 6.3 и 6.4).

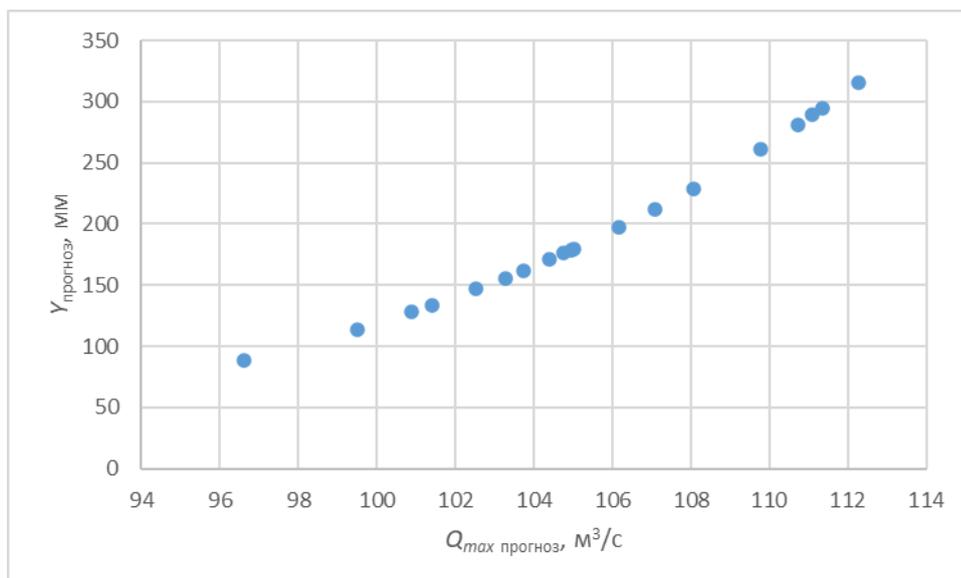


Рисунок 6.3 — Кривая зависимости $Q_{max} \text{ прогноз} = f(Y_{\text{прогноз}})$ для группы 1

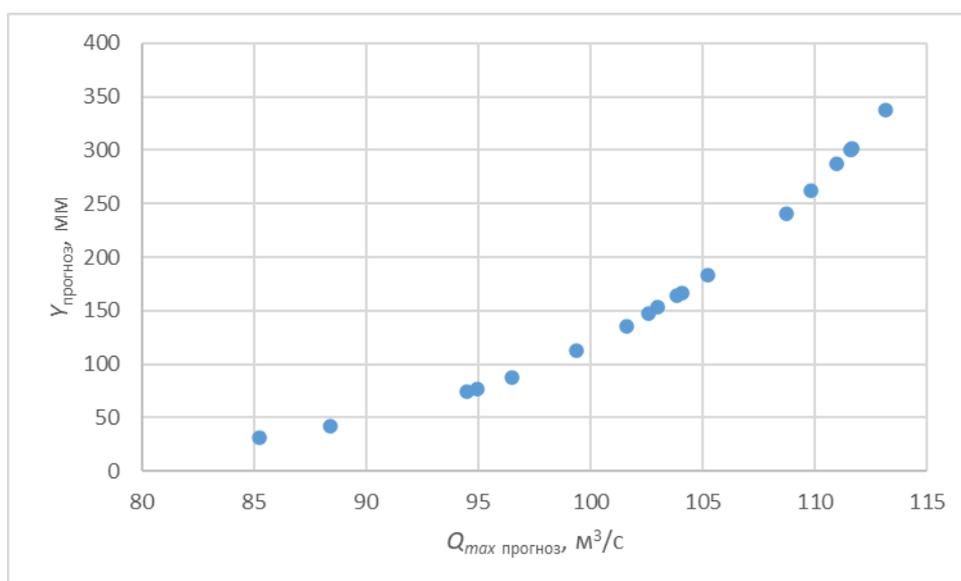


Рисунок 6.4 — Кривая зависимости $Q_{max} \text{ прогноз} = f(Y_{\text{прогноз}})$ для группы 2

7. Прогноз максимальных уровней воды

На основе графиков связи $Q_{max} = f(H_{max})$ (Приложение Б) для прогноза максимальных уровней воды в р. Тосна был выбран график связи с полиномиальной линией тренда третьей степени, так как она наилучшим образом описывает исследуемый ряд (коэффициент регрессии равен 0,8833).

Прогностическое уравнение:

$$H_{max} = -6^{-10^5} Q_{max i}^3 + 0,0121 Q_{max i}^2 + 1,806 Q_{max i} + 282,3, \quad (7.1)$$

где $Q_{max i}$ – максимальный расход воды на дату прогноза.

Ряд исходных данных был разделен на два: с 1966 по 2014 год — зависимый материал и с 2015 по 2022 – независимый материал.

На зависимом материале оценивается эффективность методики прогноза, результаты которой представлены в таблицах 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1 — Прогноз максимальных уровней воды р. Тосна на зависимом материале

Год	Дата	H_{max} факт.	Q_{max}	H_{max} прогноз	δ	δ^2	$(H_{\phi i} - H_{cp})^2$
1966	02.05	668	206	643	25	610	44318
1967	12.04	489	56,2	411	78	6027	993
1968	07.04	492	86	489	3	9	1191
1969	22.04	536	103	531	5	24	6165
	17.05	408	55,8	410	-2	5	2449
	21.05	406	55,2	409	-3	8	2650
1971	12.04	569	118	565	4	14	12436
	21.04	480	78,5	470	10	108	507
1972	18.04	536	58,7	418	118	13955	6165
1976	09.04	434	8,86	299	135	18169	551
	14.04	419	20,6	324	95	9003	1481
	19.04	517	92	504	13	165	3542
	20.04	517	92	504	13	165	3542
	06.05	442	62,7	428	14	187	240

Продолжение таблицы 7.1

Год	Дата	H_{max} факт.	Q_{max}	H_{max} прогноз	δ	δ^2	$(H_{\phi i}-H_{cp})^2$
1977	20.04	536	103	531	5	24	6165
1978	18.04	588	130	590	-2	3	17035
1979	15.04	404	53,7	405	-1	1	2860
	29.04	474	87,3	492	-18	333	273
1980	27.04	586	130	590	-4	14	16517
1981	26.03	283	12,4	306	-23	549	30444
	14.04	517	95,8	514	3	11	3542
	30.04	376	45,7	384	-8	70	6639
1982	11.04	592	135	599	-7	49	18095
1983	05.04	636	173	646	-10	104	31868
1984	10.04	598	136	601	-3	8	19745
1985	25.04	558	114	557	1	2	10104
1986	08.04	460	74,8	460	0	0	6
	26.04	540	105	536	4	17	6809
1987	03.05	531	101	526	5	22	5405
	23.05	493	86,4	490	3	9	1261
1988	09.04	520	110	548	-28	757	3908
	22.04	364	46,5	386	-22	502	8739
	02.05	296	28,6	342	-46	2157	26077
1989	06.03	364	45,1	383	-19	356	8739
	07.03	364	45,1	383	-19	356	8739
	18.03	400	56,4	412	-12	141	3304
	28.03	398	56,9	413	-15	231	3538
	13.04	260	20,5	324	-64	4082	38999
1990	28.02	570	120	570	0	0	12660

Продолжение таблицы 7.1

Год	Дата	H_{max} факт.	Q_{max}	H_{max} прогноз	δ	δ^2	$(H_{\text{фi}}-H_{\text{cp}})^2$
1990	23.03	393	51	398	-5	24	4158
1991	24.03	274	15	312	-38	1437	33666
	09.04	569	120	570	-1	0	12436
	27.04	349	37,9	365	-16	252	11769
	07.05	322	31,4	349	-27	733	18356
	18.05	232	14,3	310	-78	6150	50842
	27.05	226	13,4	309	-83	6811	53584
2008	12.04	532	102	529	3	11	5553
2009	18.04	481	76,9	465	16	242	553
2010	12.04	635	172	646	-11	112	31512
2011	21.04	599	136	601	-2	3	20027
2012	20.03	513	94,2	510	3	11	3082
	21.04	513	94,2	510	3	11	3082
2013	21.04	634	160	635	-1	2	31158
	20.05	390	10,2	302	88	7759	4554
2014	27.03	281	20,5	324	-43	1840	31146
	17.04	297	23,4	330	-33	1117	25755
	15.05	333	30,8	348	-15	215	15496
	04.06	340	4,63	291	49	2409	13802
Среднее		457,5			Σ	87388	748236

Таблица 7.2 — Оценка эффективности методики прогноза методом ГМЦ

σ	S	S/σ	Эффективность методики
118,8	40,99	0,35	Эффективна

В таблице 7.3 представлен результат прогноза на независимом материале.

Таблица 7.3 — Результат прогноза максимальных расходов воды р. Тосна на независимом материале

Год	Дата	H_{\max} факт	Q_{\max}	H_{\max} прогноз.	δ	δ^2	Оправд.	$(H_{\text{фi}} - H_{\text{cp}})^2$
2015	07.04	349	40,6	372	-23	509	+	2168
	18.04	429	64,7	434	-5	21	+	1118
	01.05	307	13,9	310	-3	7	+	7844
2016	18.04	422	62,4	428	-6	31	+	699
2017	24.03	369	38,1	365	4	13	+	706
	07.04	394	53,8	405	-11	124	+	2
	27.04	449	71,2	451	-2	2	+	2855
2018	12.04	513	90,3	500	13	172	+	13791
	19.04	596	135	599	-3	9	+	40174
2019	03.04	548	107	541	7	55	+	23236
	09.05	288	21,7	327	-39	1488	+	11570
2020	07.03	470	72,7	454	16	240	+	5541
	14.03	408	51,5	399	9	77	+	155
	20.04	246	9,59	301	-55	2990	+	22370
	21.04	246	9,56	301	-55	2983	+	22370
	06.05	254	8,46	298	-44	1972	+	20041
	20.05	265	7,72	297	-32	1020	+	17047
2021	02.04	471	60,7	423	48	2296	+	5690
	03.04	471	78,1	469	2	6	+	5690
	09.05	464	75,5	462	2	5	+	4683

Продолжение таблицы 7.3

Год	Дата	H_{\max} факт	Q_{\max}	H_{\max} прогноз.	δ	δ^2	Оправд.	$(H_{\text{фi}} - H_{\text{cp}})^2$
2022	29.03	317	19,7	322	-5	26	+	6172
	30.03	317	20	323	-6	33	+	6172
	14.04	505	91,1	502	3	10	+	11976
Ср.		395,57			Σ	14090		232072

Хронологический график фактических и прогнозных максимальных уровней воды представлен на рисунке 7.1. Оценка эффективности прогнозов представлена в таблице 7.4.

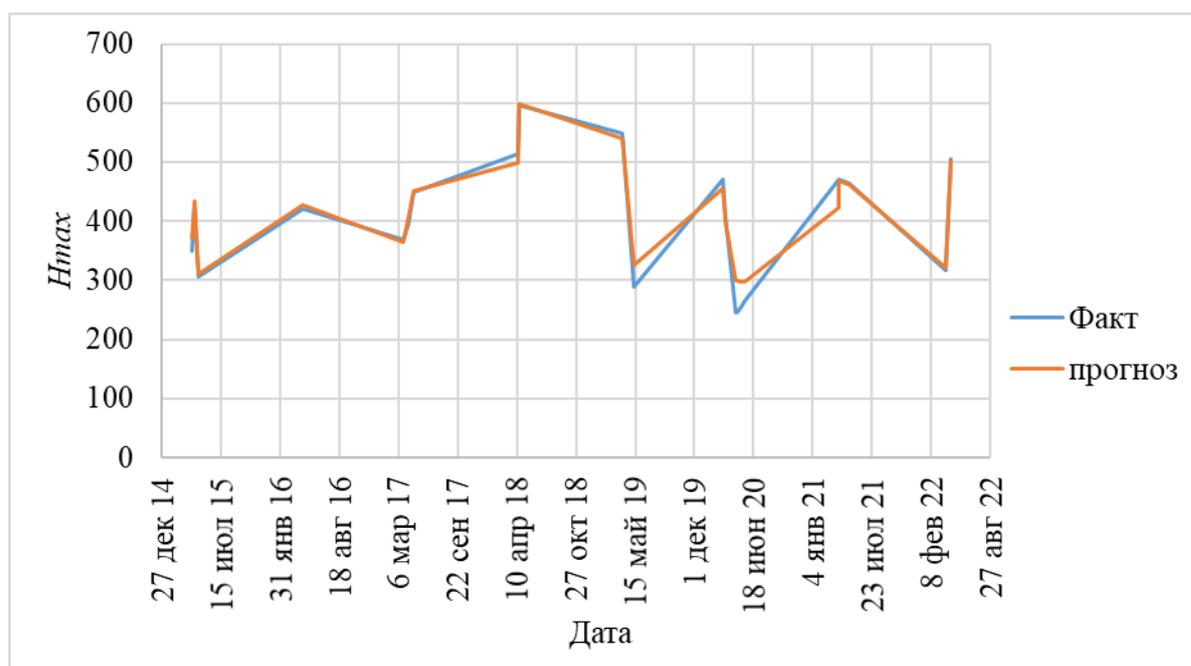


Рисунок 7.1 — Хронологический график фактических и прогнозных максимальных уровней воды

Таблица 7.4 — Оценка эффективности методики прогноза методом ГМЦ

σ	S	S/σ	Эффективность методики
118,8	25,9	0,22	Эффективна

По результатам прогноза оправдываемость является 100%, что говорит о возможности использования прогностического уравнения. На фактических данных методика показала свою эффективность.

Прогноз максимальных уровней воды с использованием спрогнозированных максимальных расходов воды представлена в таблица 7.5 – на зависимом материале, и 7.6 – на независимом материале.

Таблица 7.5 — Прогноз максимальных уровней воды на основе спрогнозированных максимальных расходов весеннего половодья на зависимом материале

Год	H_{max}	Q_{max} пр.	H_{max} пр.	δ	δ^2	Оправд.	$(H_{\phi i} - H_{cp})^2$
1966	668	112	552	116	13442	-	14641
1968	492	99	521	-29	868	+	3025
1971	569	104	534	35	1260	+	484
1976	517	105	536	-19	356	+	900
1977	536	103	531	5	24	+	121
1978	588	111	550	38	1460	+	1681
1979	474	104	534	-60	3541	-	5329
1980	586	96	514	72	5169	-	1521
1981	517	108	543	-26	671	+	900
1982	592	110	548	44	1979	+	2025
1983	636	85	486	150	22385	-	7921
1984	598	106	538	60	3572	-	2601
1985	558	105	536	22	490	+	121

Продолжение таблицы 7.5

Год	H_{max}	Q_{max} пр	H_{max} пр.	δ	δ^2	Оправд.	$(H_{\phi i}-H_{cp})^2$
1986	540	111	550	-10	96	+	49
1987	531	101	526	5	22	+	256
1989	400	109	545	-145	21087	-	21609
1990	570	105	536	34	1165	+	529
1991	569	112	552	17	287	+	484
2008	532	113	554	-22	498	+	225
2009	481	112	552	-71	5049	-	4356
2010	635	101	526	109	11811	-	7744
2011	599	97	517	82	6795	-	2704
2012	513	105	536	-23	523	+	1156
2013	634	99	521	113	12663	-	7569
2014	340	110	548	-208	43060	-	42849
Сред.	547	104,92		Σ	158273	64%	130800

Таблица 7.6 — Прогноз максимальных уровней воды на основе спрогнозированных максимальных расходов весеннего половодья на независимом материале

Год	H_{max}	Q_{max} пр	H_{max} пр	δ	δ^2	Оправд.	$(H_{\phi i}-H_{cp})^2$
2015	429	101	526	-97	9471	-	3211
2016	422	93	507	-85	7166	-	4053
2017	449	96	514	-65	4239	-	1344
2018	596	98	519	77	5925	-	12173
2019	548	90	499	49	2390	-	3885
2020	470	108	543	-73	5314	-	245
Ср.	485,67			Σ	34505	0%	24913

Результат эффективности прогноза максимальных уровней воды на зависимом и независимом материале на основе спрогнозированных расходов воды представлен в таблице 7.7.

Таблица 7.7 — Оценка эффективности методики прогноза максимальных уровней на основе спрогнозированных расходов воды на независимом материале

Материал	σ	S	S/σ	Эффективность методики
Зависимый	73,8	83,0	1,12	Не эффективна
Независимый		92,9	1,26	Не эффективна

Графики соотношения фактических и прогнозных значений максимальных уровней воды в период весеннего половодья представлены на рисунках 7.2 и 7.3.

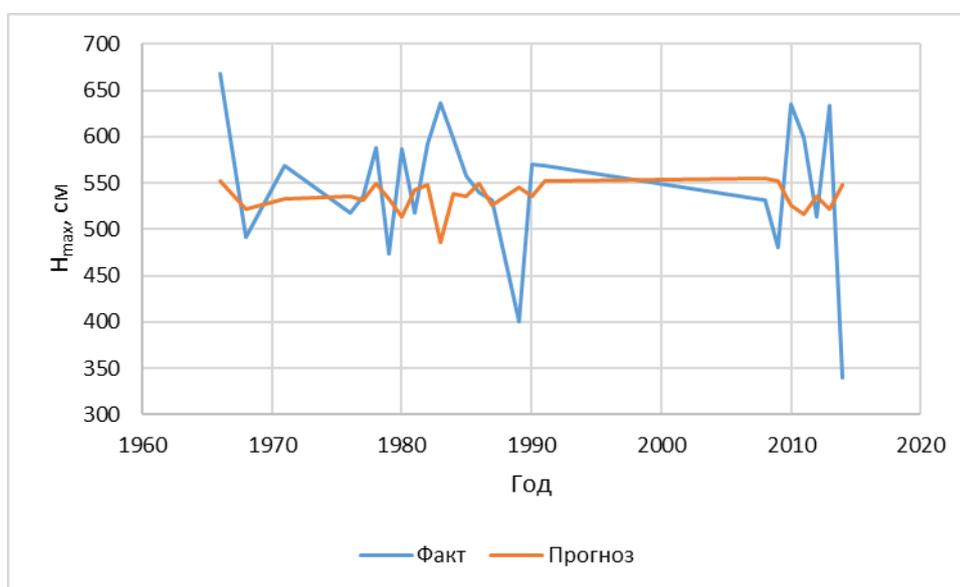


Рисунок 7.2 — График фактических и прогнозных значений максимальных уровней воды на зависимом материале

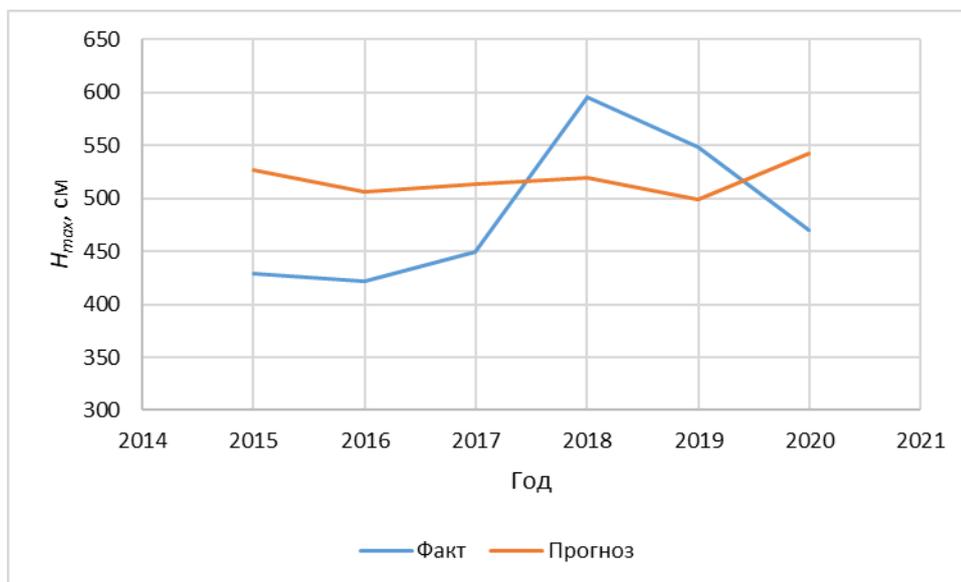


Рисунок 7.3 — График фактических и прогнозных значений максимальных уровней воды на независимом материале

Методика, разработанная на фактических данных, показала свою эффективность, так как спрогнозированные максимальные расходы воды были выполнены с плохой оправдываемостью, прогноз уровней оказался не эффективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был опробован физико–статистический метод прогноза слоя стока весеннего половодья р. Тосна, который показал не эффективность прогноза для данной реки.

В ходе выполнения кластеризации зависимого материала были выделены две группы. На основе кластерного анализа произведен дискриминантный анализ, которые исключил осадки в разделении данных на группы. Следовательно, определяющую роль в процессе кластеризации играли меженные расходы воды и снегозапасы, что соответствует условию формирования речного стока в период весеннего половодья. На основе проведенного кластерного и дискрименантного анализов были выведены прогнозные уравнения, а также интервалы меженных расходов воды и снегозапасов для определения данных независимого материала в группу. На основе полученных данных определены группы для независимого материала.

По прогностическим уравнениям для слоя стока весеннего половодья произведен прогноз, который показал недостаточную эффективность. По спрогнозированным слоям стока выполнен прогноз максимальных расходов. Данная методика показала также неудовлетворительный результат.

На заключительном этапе выполнена разработка методики прогноза максимальных уровней воды в период весеннего половодья. На основе регрессионных зависимостей максимальных уровней от максимальных расходов воды получена прогностическое уравнение, которое позволило получить 100% оправдываемость прогноза на фактических данных. При использовании спрогнозированных максимальных расходов воды в качестве предиктора, результат показал низкую оправдываемость прогноза.

Не эффективность методик можно объяснить недостаточностью длиной исходного ряда, не точностью разработанных методик, а также особенностей

гидрологического режима р. Тосна в створе г. Тосно. Для повышения эффективности рекомендуется увеличить исходный ряд данных.

В результате проведенной работы получены следующие результаты:

- Собраны и обработаны гидрометеорологические данные р. Тосна с 1966 по 2020 год;
- Выполнены поверочные прогнозы слоя стока весеннего половодья физико–статистическим методом;
- Установлены основные факторы, определяющие сток весеннего половодья;
- Собранные данные разделены на кластеры;
- Выполнен прогноз слоя стока весеннего половодья;
- Определена прогностическая зависимость максимальных уровней воды в период весеннего половодья;
- Выполнены поверочные прогнозы максимальных уровней воды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физико-географическая характеристика Ленинградской области. — Текст: электронный // Архив студенческих работ: [сайт]. — URL: https://vuzlit.com/1051216/fiziko_geograficheskaya_harakteristika_leningradskoy_oblasti (дата обращения: 25.04.2025).
2. Физико-географическое районирование Ленинградской области. — Текст: электронный // ТОПоГИС: [сайт]. — URL: <https://topogis.ru/fiziko-geograficheskoye-rayonirovaniye-leningradskoy-oblasti.php> (дата обращения: 25.04.2025).
3. Ленинградская область. — Текст: электронный // Клуб туристов Московская застава: [сайт]. — URL: <http://daikicat.narod.ru/library/region/len47/index.html> (дата обращения: 25.04.2025).
4. Климат Санкт-Петербурга и Ленинградской области // ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» URL: <http://www.meteo.nw.ru/> (дата обращения: 25.04.2025).
5. Об экологической ситуации в Ленинградской области в 2022 году. - СПб.: Комитет по природным ресурсам Ленинградской области, 2023. - 219 с. (дата обращения: 25.04.2025).
6. Бузин В.А. Методы расчета и прогноза зажорных и заторных уровней воды: автореф. дис. д-р. т.н. наук: 11.00.07. - СПб., 1995. - 40 с.
7. Савичев О.Г., Льготин В.А. Методика оценки уровней вод реки Томь при ледовых заторах и зажорах у г. Томска // Гидрогеология. - Т.: Известия Томского политехнического университета, 2011. - С. 135-140.
8. Бузин В.А. Закономерности формирования и прогноз максимального уровня воды при заторе льда // Метеорология и гидрология. - 2006. - №8. - С. 83-91.

9. Бузин В.А., Горошкова Н.И., Стриженок А.В., Палкина Д.А. Зависимость для прогнозов максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины и влияние на них климатических и антропогенных факторов // Записки ученого №36. - С. 12-21.

10. В Тосненском районе начался настоящий потоп. — Текст: электронный // Рамблер: [сайт]. — URL: <https://news.rambler.ru/weather/50444998-v-tosnenskom-rayone-nachalsya-nastoyaschiy-potop/> (дата обращения: 04.05.2025).

11. Подъезд к дому в Тосно затоплен, дорога разбита. — Текст: электронный // Мы Народный Контроль: [сайт]. — URL: <https://nkregion.ru/news/podezd-k-domu-v-tosno-zatoplen-doroga-razbita/> (дата обращения: 04.05.2025).

12. Желтый уровень опасности объявлен из-за наводнения в Тосно. — Текст: электронный // 47NEWS: [сайт]. — URL: <https://47news.ru/articles/264441/> (дата обращения: 04.05.2025).

13. Тосно под контролем: спасатели мониторят паводковую ситуацию в городе. — Текст: электронный // 47channel: [сайт]. — URL: <https://47channel.ru/event/tosno-pod-kontrolem-spasateli-monitoryat-pavodkovuyu-situaciyu-v-gorode> (дата обращения: 04.05.2025).

14. Наводнение в Ленинградской области – фоторепортаж из Тосно. — Текст: электронный // Вечерний Петербург: [сайт]. — URL: <http://vppress.ru/stories/Navodnenie-v-Leningradskoi-oblasti--fotoreportazh-iz-Tosno-17065> (дата обращения: 04.05.2025).

15. Форма 15. Расход воды рек, ручьев, каналов, куб. м/с Форма 15. Выходная информация. — Текст: электронный // Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов: [сайт]. — URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (дата обращения: 09.10.2024).

16. Форма 14. Уровни воды рек, ручьев, каналов, см Форма 14. Выходная информация. — Текст: электронный // Автоматизированная

информационная система государственного мониторинга водных объектов: [сайт]. — URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (дата обращения: 17.10.2024).

17. Уровень воды в реке Тосна (ст. Тосно) сегодня Архивные данные. — Текст: электронный // ALLRivers Уровень воды онлайн: [сайт]. — URL: <https://allrivers.info/gauge/tosna-tosno/waterlevel> (дата обращения: 03.05.2025).

18. Суточные данные. — Текст: электронный // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: [сайт]. — URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения: 09.10.2024).

19. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «ОПИСАНИЕ МАССИВА ДАННЫХ “МАРШРУТНЫЕ СНЕГОМЕРНЫЕ СЪЕМКИ”» Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620279. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys#описание-массива-данных> (дата обращения 05.05.2023).

20. Крестовский О.И. Весенний сток и потери талых вод в лесу и в поле [Текст] / О.И. Крестовский, Н.В. Соколова // Труды ГГИ. – 1980. – Вып. 265. – С. 32 – 59.

21. Смирнов Н. П. Физико-статистический метод долгосрочного прогноза талого стока рек / Н. П. Смирнов, В. Л. Скляренко, В. Н. Скляренко. — Текст: непосредственный // Межвузовские сборник научных трудов. Выпуск 79. — Л.: ЛПИ, 1982. — С. 19-26.

22. Бефани, Н. Ф. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам / Н. Ф. Бефани, Г. П. Калинин. — 2-е изд. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983. — 390 с. — Текст: непосредственный.

23. Георгиевский Ю. М. гидрологические прогнозы / Ю. М. Георгиевский, С. В. Шаночкин. — СПб: РГГМУ, 2007. — 436 с. — Текст: непосредственный.

24. Руководство по гидрологическим прогнозам. — Выпуск 1. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. — 358 с. — Текст: непосредственный.

25. Попов, Е. Г. Гидрологические прогнозы / Е. Г. Попов. — 2-е изд. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. — 256 с. — Текст: непосредственный.
26. Георгиевский, Ю. М. Гидрологические прогнозы / Ю. М. Георгиевский, С. В. Шаночкин. — Санкт-Петербург: РГГМУ, 2007. — 436 с. — Текст: непосредственный.
27. Аполлов, Б. А. Гидрологические прогнозы / Б. А. Аполлов, Г. П. Калинин, В. Д. Комаров. — Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1960. — 408 с. — Текст: непосредственный.
28. Ванюкова Д.Д. Выпускная квалификационная работа (ВКР). Бакалаврская работа. Прогноз максимальных расходов весеннего половодья. Кафедра Инженерной гидрологии. Направление подготовки: 05.03.05 Прикладная гидрометеорология. Профиль: Прикладная гидрология. Руководитель Викторова Н. В. / Д. Д. Ванюкова. — СПб, 2023. — 77 с. — Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчет прогноза слоя стока весеннего половодья физико-статистическим методом

Таблица А.1 — Расчет прогноза слоя стока весеннего половодья на зависимом материале

Год	Исходные данные				S+X	P ₀	lgP ₀	Po'	S+X _{cp}	Прогноз I						Прогноз II						
	Y, мм	S, мм	X, мм	I _w , мм						$\frac{S+X}{e \frac{P'}{P_0}}$	$\frac{-S+X}{e \frac{P'}{P_0}}$	$th \frac{S+X}{P_0'}$	Y _I	δ _I	δ _I ²	$\frac{S+X_{cp}}{e \frac{P'}{P_0}}$	$\frac{S+X_{cp}}{e \frac{P'}{P_0}}$	$th \frac{S+X_{cp}}{P_0'}$	Y _{II}	δ _{II}	δ _{II} ²	(Y _{фи} - Y _{cp}) ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11'	11''	11	12	13	14	15'	15''	15	16	17	18	19
1966	233	183	163	5,66	346	136	2,13	70,1	267,7	139	0,01	1,00	276	-42,5	1808	46	0,02	1,00	198	35	1247	12398
1968	124	98	90,2	1,97	188	78,5	1,89	62,3	182,7	20	0,05	1,00	126	-2,1	4	19	0,05	0,99	121	3	11	6
1971	212	33	111	0,62	144	-55,6	1,75	59,7	117,7	11	0,09	0,98	85,3	126,7	16043	7	0,14	0,96	60	152	23024	8162
1976	113	151	95,0	1,00	246	191	2,28	60,4	235,7	59	0,02	1,00	186	-72,6	5271	49	0,02	1,00	175	-62	3883	75
1977	117	91	93,3	4,45	184	83,7	1,92	67,4	175,7	15	0,07	0,99	117	-0,4	0	14	0,07	0,99	109	8	64	22
1978	114	129	107	5,59	236	172,0	2,24	69,9	213,7	29	0,03	1,00	166	-52,4	2744	21	0,05	1,00	144	-30	905	59
1979	134	141	62,6	2,22	204	85,2	1,93	62,8	225,7	26	0,04	1,00	141	-7,0	49	36	0,03	1,00	163	-29	839	152
1980	103	100	49,5	1,80	149	55,6	1,75	62,0	184,7	11	0,09	0,98	88,4	14,6	212	20	0,05	0,99	123	-20	401	348
1981	111	93	39,7	3,60	133	23,7	1,37	65,6	177,7	8	0,13	0,97	69,3	41,7	1737	15	0,07	0,99	113	-2	3	114
1982	141	157	61,0	1,68	218	95,0	1,98	61,8	241,7	34	0,03	1,00	156	-15,3	236	50	0,02	1,00	180	-39	1520	374
1983	113	68	89,7	0,77	158	52,6	1,72	60,0	152,7	14	0,07	0,99	98,3	14,7	215	13	0,08	0,99	93	20	383	75
1984	119	163	29,4	3,13	192	92,4	1,97	64,7	247,7	20	0,05	0,99	128	-9,0	81	46	0,02	1,00	183	-64	4108	7
1985	117	98	56,2	5,56	154	42,5	1,63	69,9	182,7	9	0,11	0,98	86,0	31,0	963	14	0,07	0,99	114	3	12	22
1986	162	92	85,4	7,89	177	16,1	1,21	75,2	176,7	11	0,09	0,98	104	58,5	3422	10	0,10	0,98	103	59	3501	1628
1987	149	115	70,7	4,12	186	40,9	1,61	66,7	199,7	16	0,06	0,99	120	29,5	872	20	0,05	0,99	133	16	246	748
1988	118	76	59,0	4,45	135	18,2	1,26	67,4	160,7	7	0,14	0,96	70,0	48,0	2306	11	0,09	0,98	94	24	557	13
1989	116	59	132	1,02	191	95,0	1,98	60,5	143,7	23	0,04	1,00	131	-14,6	213	11	0,09	0,98	84	32	1007	32
1990	138	52	167	9,35	219	101	2,01	78,8	136,7	16	0,06	0,99	141	-3,0	9	6	0,18	0,94	63	75	5676	267
1991	149	56	135	0,81	191	47,2	1,67	60,1	140,7	24	0,04	1,00	131	18,0	325	10	0,10	0,98	82	67	4526	748
1993	98,9	49	70,5	0,83	120	22,6	1,35	60,1	133,7	7	0,14	0,96	61,6	37,3	1391	9	0,11	0,98	75	24	572	518
1994	100	91	79,7	3,83	171	91,3	1,96	66,1	175,7	13	0,08	0,99	105	-5,3	28	14	0,07	0,99	110	-10	105	469
1995	216	89	186	0,16	275	66,1	1,82	58,8	173,7	107	0,01	1,00	216	0,1	0	19	0,05	0,99	115	101	10166	8901
1996	88,5	68	91,9	0,18	160	94,6	1,98	58,9	152,7	15	0,07	0,99	102	-13,0	170	13	0,07	0,99	94	-6	36	1099
1998	123	85	129	1,87	214	118	2,07	62,1	169,7	31	0,03	1,00	152	-28,7	824	15	0,07	0,99	108	15	222	2

Продолжение таблицы А.1

2000	92,0	43	102	2,56	145	65,6	1,82	63,5	127,7	10	0,10	0,98	82,6	9,4	89	7	0,13	0,96	66	26	654	879
2001	93,0	55	69,8	0,39	125	36,7	1,56	59,3	139,7	8	0,12	0,97	67,3	25,7	663	11	0,09	0,98	81	12	133	821
2002	91,1	71	156	0,086	227	208	2,32	58,7	155,7	48	0,02	1,00	169	-77,4	5990	14	0,07	0,99	98	-6	42	934
2003	57,8	72	93,9	4,24	166	175	2,24	67,0	156,7	12	0,08	0,99	99,8	-42,0	1768	10	0,10	0,98	91	-33	1098	4077
2004	130	76	58,2	5,50	134	4,2	0,62	69,7	160,7	7	0,15	0,96	67,3	62,7	3927	10	0,10	0,98	92	38	1418	70
2005	125	71	61,8	0,053	133	8,0	0,90	58,6	155,7	10	0,10	0,98	75,4	49,6	2464	14	0,07	0,99	98	27	749	11
2006	78,3	78	78,4	0,32	156	108	2,03	59,1	162,7	14	0,07	0,99	97,8	-19,5	380	16	0,06	0,99	104	-26	662	1880
2007	54,0	43	61,2	0,22	104	68,5	1,84	59,0	127,7	6	0,17	0,94	48,6	5,4	29	9	0,11	0,97	70	-16	265	4577
2008	122	58	40,5	2,15	98	-21,1	1,32	62,7	142,7	5	0,21	0,92	41,0	81,0	6567	10	0,10	0,98	81	41	1655	0
2009	74,3	68	31,1	5,09	99	28,5	1,45	68,8	152,7	4	0,24	0,89	37,6	36,7	1350	9	0,11	0,98	85	-11	125	2242
2010	178	171	60,6	1,16	232	61,0	1,79	60,7	255,7	45	0,02	1,00	171	7,1	50	67	0,01	1,00	195	-17	288	3175
2011	170	185	51,1	2,81	236	77,5	1,89	64,0	269,7	40	0,03	1,00	172	-2,2	5	68	0,01	1,00	206	-36	1275	2337
2012	95,9	67	71,0	2,84	138	50,2	1,70	64,1	151,7	9	0,12	0,97	75,6	20,3	411	11	0,09	0,98	89	7	51	663
2013	115	95	79,7	0,83	175	73,0	1,86	60,1	179,7	18	0,05	0,99	115	0,1	0	20	0,05	0,99	120	-5	24	44
2014	58,7	18	35,6	1,20	54	-4,9	0,69	60,8	102,7	2	0,41	0,71	10,6	48,1	2314	5	0,18	0,93	46	13	164	3963
Ср.	121,7	89,9	84,7	2,62										∑	64945					∑	71618	61912

Таблица А.2 — Расчет прогноза слоя стока весеннего половодья на не зависимом материале

Год	Исходные данные				S+X	P ₀	lgP ₀	P ₀ '	S+X _{ср}	Прогноз I						Прогноз II						
	Y, мм	S, мм	X, мм	I _w , мм						$\frac{S+X}{e \frac{P_0'}{P_0}}$	$\frac{S+X}{e \frac{P_0'}{P_0}}$	$th \frac{S+X}{P_0'}$	Y _I	δ _I	δ _I ²	$\frac{S+X_{ср}}{e \frac{P_0'}{P_0}}$	$\frac{S+X_{ср}}{e \frac{P_0'}{P_0}}$	$th \frac{S+X_{ср}}{P_0'}$	Y _{II}	δ _{II}	δ _{II} ²	(Y _{фи} - Y _{ср}) ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11'	11''	11	12	13	14	15'	15''	15	16	17	18	19
2015	80	106	1,3	186	184	23,7	2571	0,00	1,0	162	2393	0,00	1,00	161	86	-76,4	-	-74,7	-	430	2015	80
2016	25	139	4,01	164	129	23,7	1023	0,00	1,0	140	236	0,00	1,00	106	82	-58,8	-	-24,1	удовл.	267	2016	25
2017	41	123	6,39	164	145	23,6	1030	0,00	1,0	140	467	0,00	1,00	122	29	-111,6	-	-92,9	-	1322	2017	41
2018	49	70,6	4,77	120	153	23,7	157	0,01	1,0	96	652	0,00	1,00	130	42	-53,8	-	-87,5	-	532	2018	49
2019	115	102	0,73	217	219	23,7	9498	0,00	1,0	193	10466	0,00	1,00	196	36	-157,5	-	-159,8	-	862	2019	115
2020	6	85,2	0,65	91,2	110	23,7	47	0,02	1,0	68	105	0,01	1,00	87	138	70,1	-	51,0	-	5248	2020	6
Ср.	52,7	104													65,2					8661	Ср.	52,7

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Графики зависимостей максимальных уровней воды от максимальных расходов за период весеннего половодья

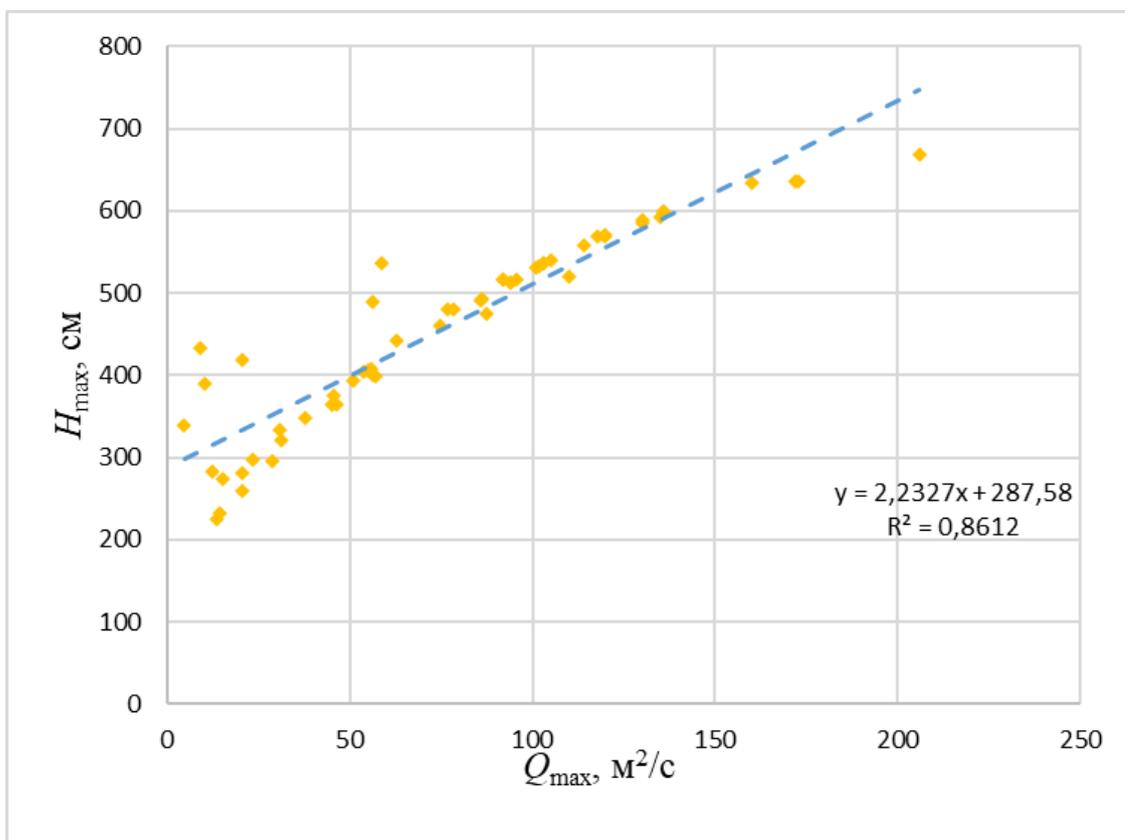


Рисунок Б.1 — График связи $Q_{max} = f(H_{max})$ с линейной линией тренда

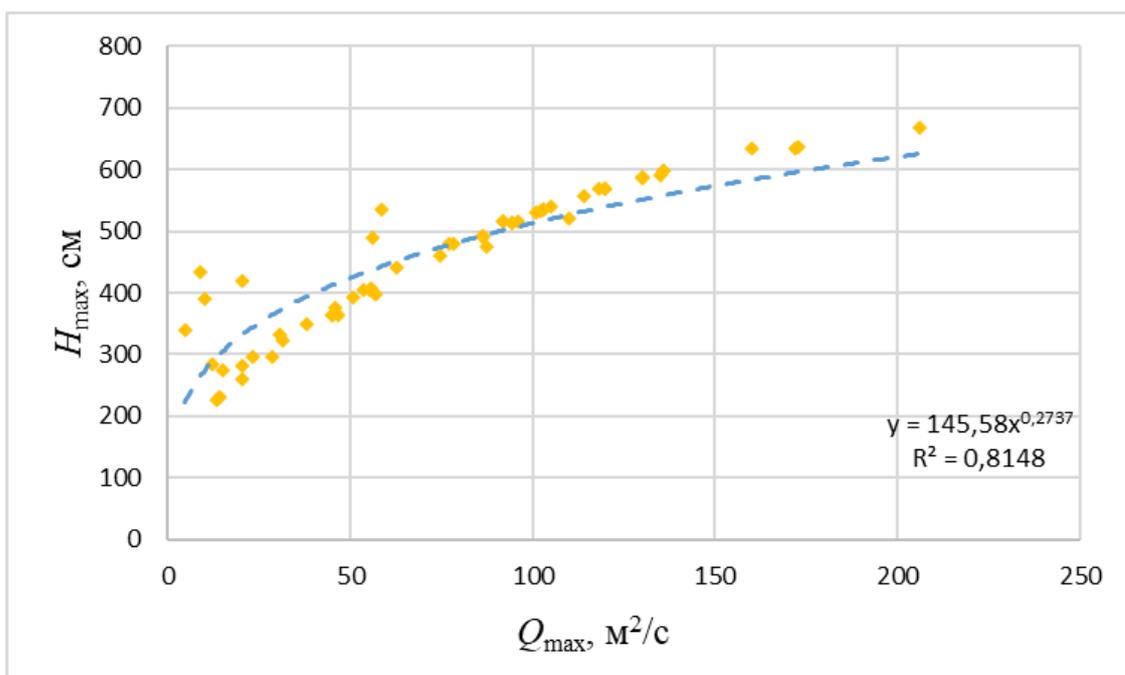


Рисунок Б.2 — График связи $Q_{max} = f(H_{max})$ с степенной линией тренда

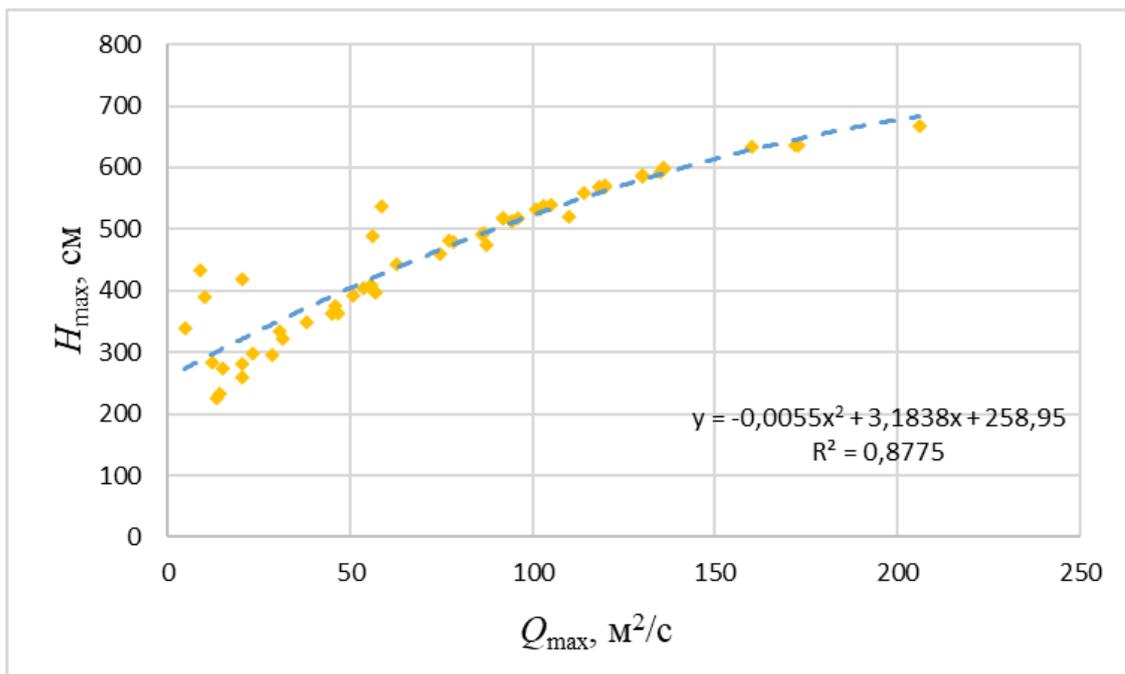


Рисунок Б.3 — График связи $Q_{max} = f(H_{max})$ с логарифмической линией тренда

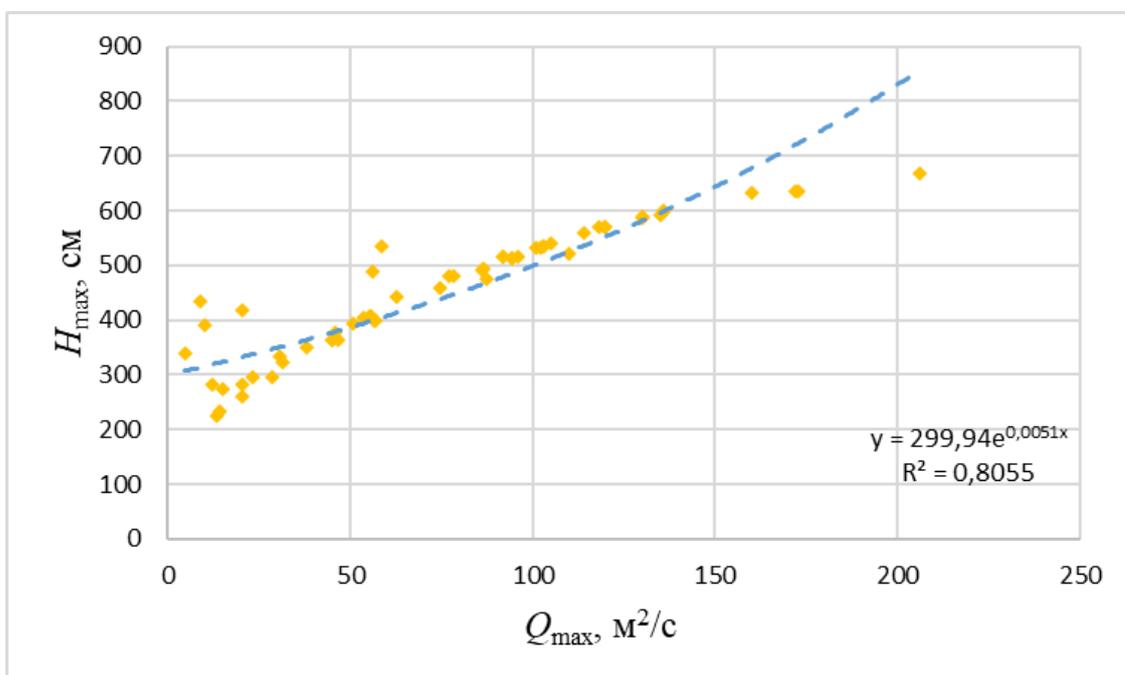


Рисунок Б.4 — График связи $Q_{max} = f(H_{max})$ с экспоненциальной линией тренда

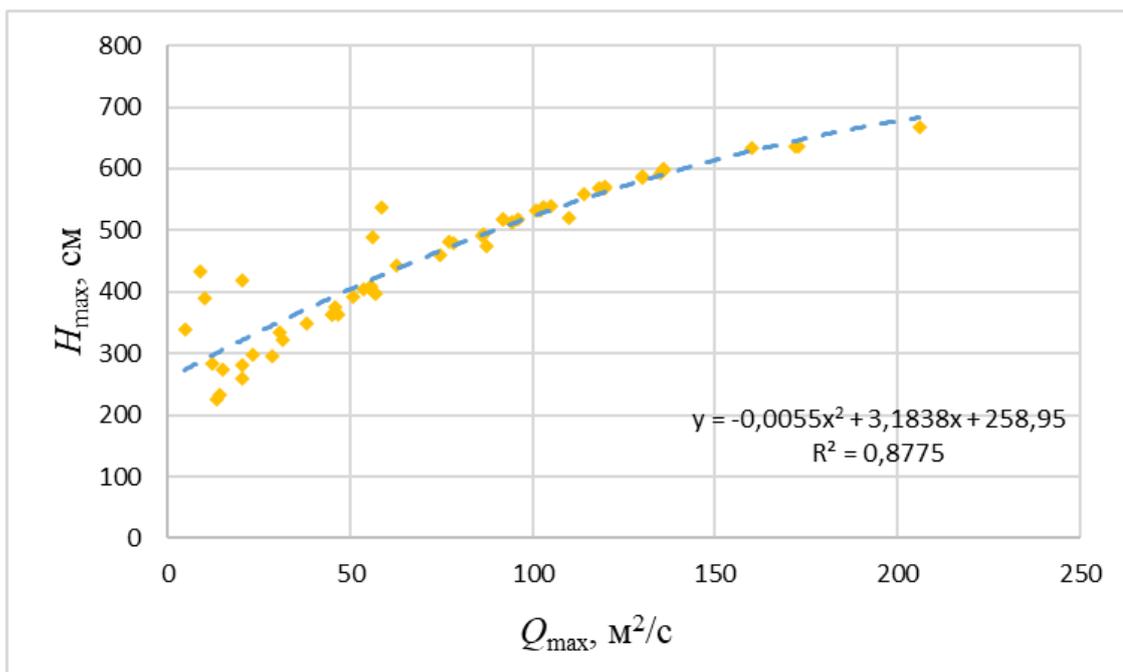


Рисунок Б.5 — График связи $Q_{max} = f(H_{max})$ с полиномиальной линией тренда второй степени

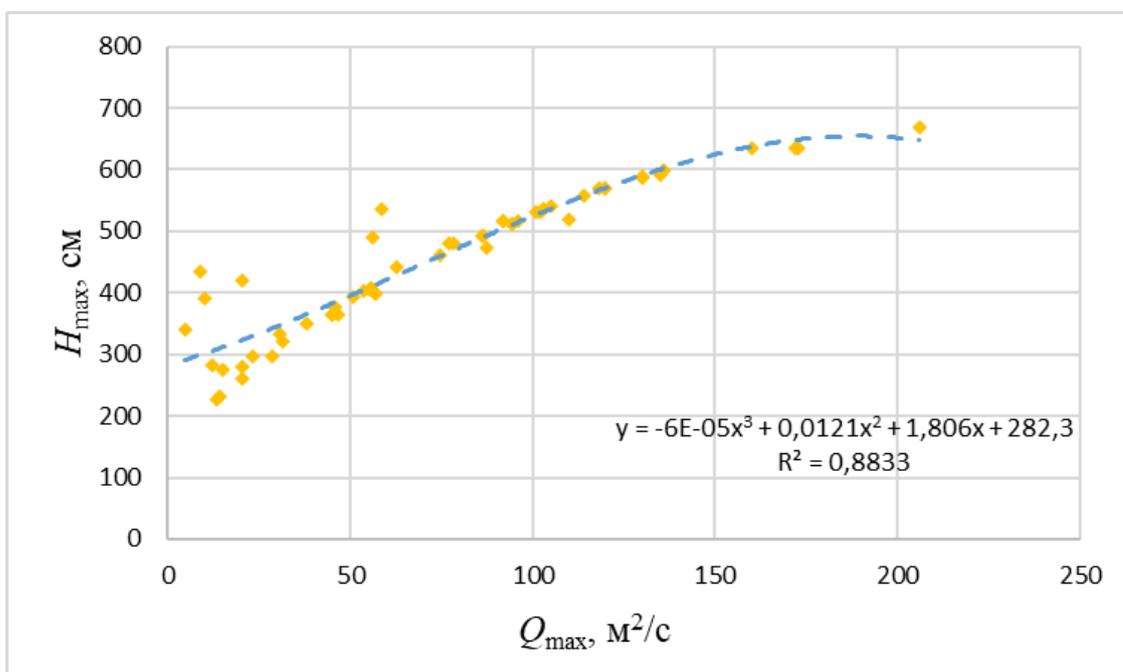


Рисунок Б.6 — График связи $Q_{max} = f(H_{max})$ с полиномиальной линией тренда третьей степени