



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(выпускная квалификационная работа)

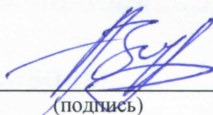
На тему **Прогноз максимальных
расходов весеннего половодья**

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)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«12» 06 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Содержание.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Физико-географическое описание	6
1.1 Местоположение.....	6
1.2 Рельеф и геологическое строение	6
1.3 Почвенные покров	9
1.4 Растительный покров	10
1.5 Климатическая характеристика	10
1.6 Гидрологическая изученность.....	12
2. Долгосрочный прогноз основных характеристик весеннего стока.....	14
2.1 Расчет по уравнению водного баланса.....	14
2.2 Физико-статистический метод долгосрочного прогноза весеннего половодья	18
2.3 Статистические методы	23
3. Исходные данные.....	25
3.1 Объект исследование.....	25
3.2 Сбор и обработка исходных данных	27
4. Прогноз стока весеннего половодья	42
4.1 Прогноз стока весеннего половодья физико-статистическим методом 42	
4.2 Прогноз стока весеннего половодья статистическим методом	45
5. Прогноз максимальных расходов	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	58
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты поверочных прогнозов слоя стока половодья физико-статистическим методом	60
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты поверочных прогнозов слоя стока половодья	60
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты прогнозов слоя стока половодья.....	71

ВВЕДЕНИЕ

Ледоход и весеннее половодье – естественная закономерность в жизни реки. Весной начинается интенсивное таяние снега, и это причины возникновения половодья, то есть быстрого стока талого снега в русла рек. Н каждый год этот процесс индивидуален, как и вообще гидрологический режим реки. Если в метеорологии для атмосферы существует целый ряд универсальных закономерностей, единых для различных масштабов – от миллиметров до тысяч километров, то для каждой реки существуют свои закономерности. Условия формирования весеннего половодья значительно меняются год от года. Каждый год накапливается разное количество снега, почва обладает разной водопроницаемостью, с различной интенсивностью протекают процессы таяния снежного покрова. Формирование высокого весеннего половодья и возможность наводнений в долинах рек вызываются следующими причинами:

- высокое осеннее увлажнение почвы;
- накопление больших запасов воды в снежном покрове;
- позднее наступление весеннего потепления с резким подъемом температуры воздуха;
- значительное количество весенних осадков, увеличивающих суммарное поступление воды в период снеготаяния.

Актуальность выбранной тематики обуславливается необходимостью прогнозирования весеннего стока в целях предотвращения наводнений. Выход рек из берегов могут нести необратимые последствия во многих отраслях, например, таких как сельское хозяйство, промышленность и экономике. Обнаружение и предотвращение наводнений возможны благодаря прогнозу объема и максимума половодья – основным характеристикам весеннего стока.

Выпускная работа посвящена разработке методики прогноза стока весеннего половодья на реке Тосна. Данная методика имеет практическую значимость, поскольку город Тосно относится к одной из затапливаемых зон Ленинградской области, река практически каждый год выходит из берегов в период весеннего половодья.

Прогноз элементов весеннего половодья является очень важной практической задачей. В период подготовки к половодью и прохождению ледохода, решающую роль играют гидрологические прогнозы, эффективная система оповещения эвакуация населения. В связи с постоянными изменениями гидрометеорологических элементов, гидрологические прогнозы корректируются, что позволяет либо усилить угрозу ожидаемого явления, либо заблаговременно снять угрозу чрезвычайного явления. Расчеты показывают, что правильное использование гидрологической информации в среднем снижает ущерб на 30 – 60%.

Цель работы заключается в том, что на основе анализа условий формирования весеннего половодья на р. Тосна выявить основные обуславливающие факторы, определить степень влияния факторов естественного регулирования на его величину и на основе этого разработать метод прогноза, который давал бы возможность с достаточной степенью точности выпускать прогнозы элементов весеннего половодья с большой заблаговременностью. Т.к. половодья на реке Тосна проходит в апреле – мае, при выпуске прогнозов 1 марта их заблаговременность равна месяцу и более.

Исходя из поставленной цели, в работе решались следующие задачи:

- 1) сбор и анализ исходной гидрометеорологической информации;
- 2) разработка методики выпуска долгосрочного прогноза стока за период половодья и максимальных расходов;
- 3) проверка эффективности полученных прогностических зависимостей;
- 4) выпуск и оценка поверочных прогнозов.

1. Физико-географическое описание

1.1 Местоположение

Северо-запад Восточно-Европейской равнины — Ленинградская область с выходом к Балтийскому морю и двум крупным озерам. Ленинградская область состоит из 1 городского округа и 17 районов, один из которых Тосненский (рис. 1.1). Тосненский район расположен на юго-востоке Санкт-Петербурга [1].



Рисунок 1.1 — Районы Ленинградской области

1.2 Рельеф и геологическое строение

Ленинградская область — это уникальная территория, которая находится на стыке двух гигантских геологических структур — Балтийского кристаллического щита и Русской плиты. Именно это географическое положение делает этот район особенным и интересным для исследования.

Северо-западная часть Ленинградской области расположена на Кристаллическом щите Балтийского моря, где обнажаются архейские и раннепротерозойские вулканические породы.

Кроме того, на северной части Карельского перешейка можно встретить биотитовые, роговообманково-биотитовые и слюдяные гнейсы и кристаллические сланцы.

Наконец, западная часть Ленинградской области, вдоль побережья Финского залива, известна верхнепротерозойскими гранитами рапакиви. Эти породы являются частью уникального геологического комплекса.

Таким образом, Ленинградская область представляет собой уникальную территорию, где можно узнать о многих геологических процессах и образованиях, которые привели к формированию этого района.

На Русской платформе в северо-западной части преобладает осадочный тип пород, образованный в период с верхнего протерозоя по пермь. На юге и юго-востоке области скалы омолодились, тогда как на остальной территории можно проследить основания палеозойской эпохи. Кстати, в районе Московской синеклизы фундаменты значительно глубже.

Начнем с того, что Русская платформа сложена осадочными породами, которые формируются океаном. Однако выветривание и эрозия, вызванные действием рек, приводят к разрушению оснований и образованию низменностей вдоль Финского залива, Ладожского озера и крупных речных бассейнов, а также формированию возвышенностей (крупнейших на северо-востоке области).

Кроме того, из-за движения ледников меняется рельеф, что приводит к созданию ледниковых озер. Они появляются как результат активности ледников и, после понижения уровня воды, переходят в равнины.

Таким образом, Русская платформа представляет собой сложный ландшафтный образец, охватывающий многообразие пород и форм рельефа.

Вокруг Финского залива простираются низменности, ограниченные Балтийско-Ладожским глинтом. Этот обрыв состоит из нескольких террас и возвышающихся уступов высотой до 60 метров. Он был образован древним морем,

уровень которого выше уровня Балтийского моря. Сток подземных вод, проходящих через Ижорское плато, попадает на скальный склон и имеет здесь свой выход [1, 2, 3].

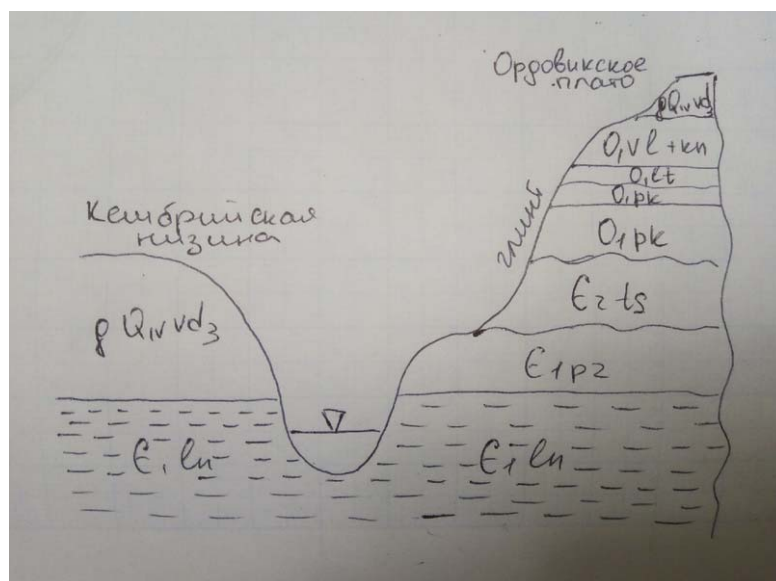
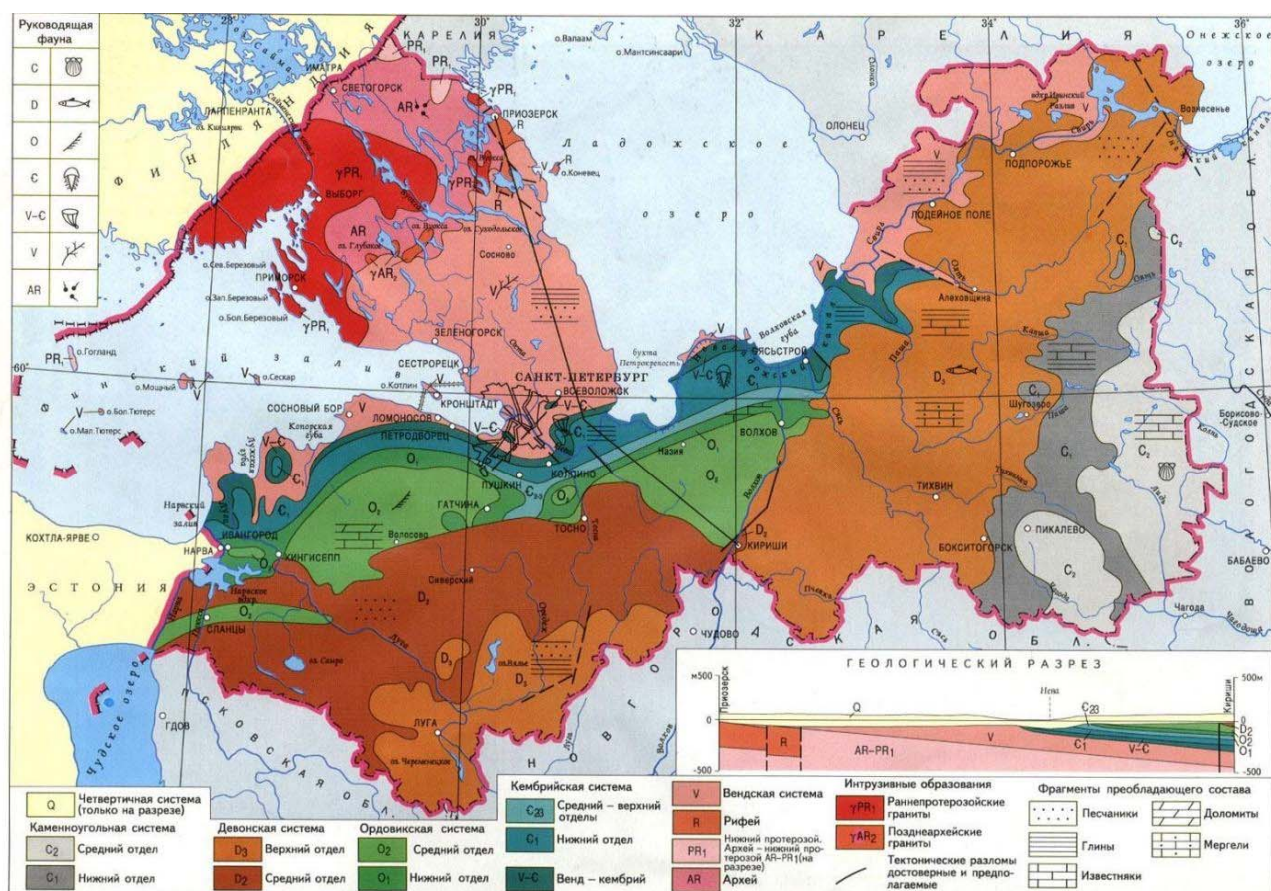


Рисунок 1.2 — Уступ Балтийско-Ладожского глинта



Масштаб 1: 2 000 000

Рисунок 1.3 — Геологическая карта Ленинградской области

Кроме того, Ленинградская область известна богатыми запасами полезных ископаемых. Здесь можно найти бокситы, горючие сланцы, фосфориты и торф.

1.3 Почвенные покров

Влияние на почвы оказывает множество факторов, таких как увлажнение, осадки и грунтовые воды. Эти факторы могут оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на почву. Например, умеренные осадки могут быть благотворными для почвы, но слишком большое количество осадков может привести к эрозии почвы и потере плодородия.

В области, которую мы рассматриваем, преобладают подзолистые почвы, которые имеют высокий уровень кислотности. Эти почвы не совсем подходят для сельского хозяйства, но могут быть использованы для лесного хозяйства или других сельскохозяйственных целей.

Большинство территории состоит из болот, где почвы подзолисто-глеевые и торфянисто-подзолисто-глеевые. Эти почвы могут быть сложными для использования, но могут быть превращены в плодородные почвы при использовании соответствующих методов обработки.

Территория, определенная под пашни, составляют песчаники и суглинки с валунами. Эти почвы могут быть довольно плодородными, но требуют особого ухода и обработки, чтобы сохранить свою плодородность.

Небольшую площадь составляют дерно-карбонатные почвы, которые богаты минеральными веществами в районе Ордовикского плато. Эти почвы могут быть очень плодородными и подходят для использования в сельском хозяйстве.

В низинах преобладают сильноподзолистые почвы, состоящие из глин, песков и суглинков. Эти почвы могут быть очень плодородными, но также могут требовать особого ухода и обработки, чтобы сохранить свою плодородность. В целом, наша область имеет разнообразные типы почв, каждый из которых требует особого внимания и подхода при использовании в сельском хозяйстве или других целях.

Переувлажненные почвы в Волховском, Киришском и Тосненском районах — это не только проблема, но и возможность. На этих территориях широко применяются гидротехнические и агромелиоративные мероприятия, чтобы использовать ресурсы почвы максимально эффективно. Среди таких мероприятий можно назвать мелиорацию, дренажирование, орошение и другие. Они позволяют увеличить плодородие почвы, повысить урожайность и улучшить экологическую ситуацию в регионе. Кроме того, гидротехнические работы помогают снизить уровень подтоплений и повысить безопасность населения и имущества. Таким образом, наличие переувлажненных почв в Волховском, Киришском и Тосненском районах не является препятствием для развития аграрной отрасли, а наоборот, стимулом для внедрения новых технологий и подходов к земледелию [1].

1.4 Растительный покров

Ленинградская область располагается в таежной зоне, больше половины территории области покрыто смешанными лесами. По берегам рек Свири, Паши, Ояти наблюдаются наиболее крупные участки лесов, в которых преобладают сосны, ели и березы. На западе и юге можно встретить клён, дуб, липу, ольху, вязь, ясень. Ленинградская область богата лесными ягодами (клюква, брусника, можжевельник, черника) [1, 2].

1.5 Климатическая характеристика

Атлантико-континентальный умеренный климат приносит в Ленинградскую область холодные зимы и нежаркое влажное лето. Весна и осень имеют продолжительный период.

Непостоянство и изменчивость погоды объясняется сменой воздушных масс и активной деятельностью циклона. Близость океана в следствие приносит

циклоны на территорию Ленинградской области, а с ними и пониженные температуры воздуха, сильные ветра, осадки, высокую влажность.

Весной температура воздуха прогревается медленно. Похолодание прерывает теплую погоду иногда на продолжительное время. В большинстве случаев погода ясная. По окончании заморозков ночью наступает лето. Начало лета ясное, а вот к концу становится облачно, прохладно и дождливо. С наступлением осени повышается облачность, часто идут дожди, туманы, влажность становится высокой.

Температура воздуха повышается с востока к юго-западу. Осадки выпадают неравномерно, наибольшее количество осадков наблюдается на возвышенностях, наименьшее на прибрежных низменностях. За год выпадает 600-800 мм осадков. Наибольшее количество осадков выпадает в летние и осенние месяцы.

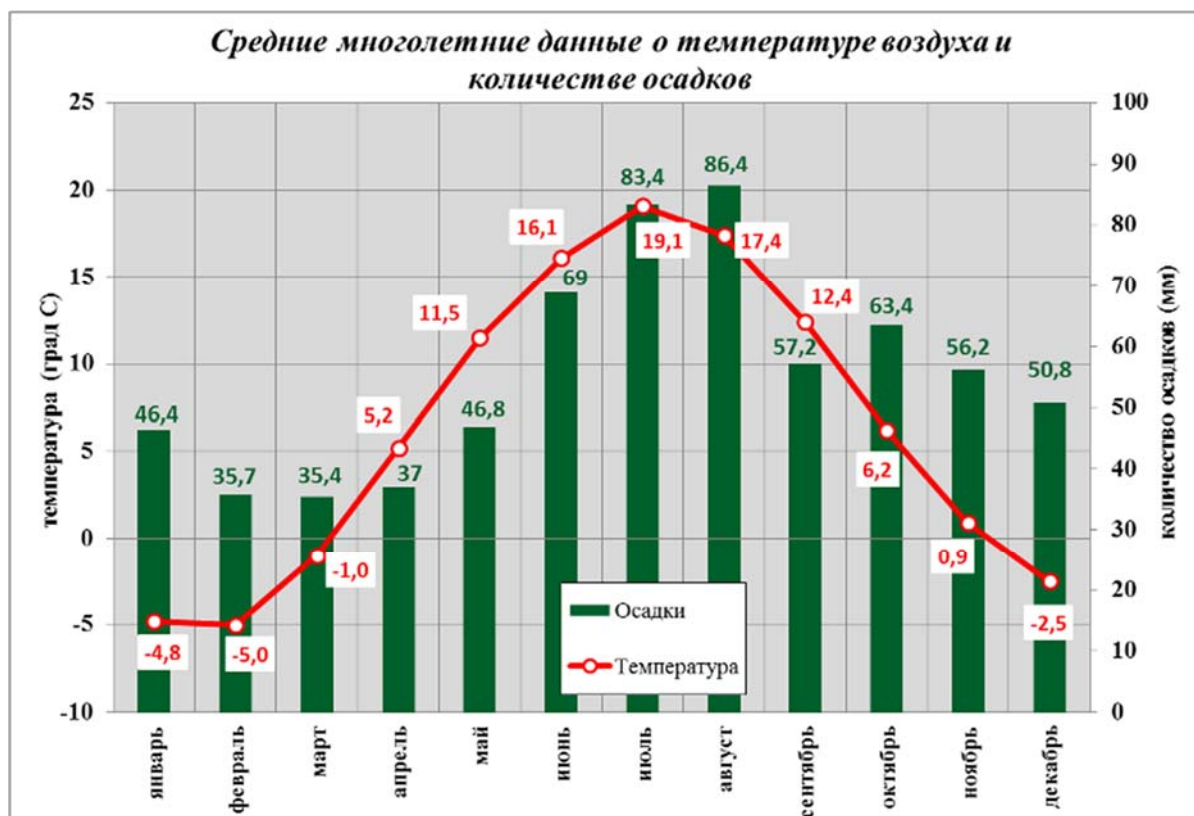


Рисунок 1.4 — Средние многолетние данные о температуре воздуха и количестве осадков в Санкт-Петербурге

1.6 Гидрологическая изученность

Большая часть территории относится к бассейну Балтийского моря, и только восточная часть относится к Волжскому бассейну. Ладожское и Онежское озера являются одними из самых прозрачных, так как в них низкий уровень минерализации и наносов. Эти озера имеют ледово-тектоническое происхождение. Наиболее крупными реками являются Нева, Свирь, Волхов.



Рисунок 1.5 — Девять крупных рек Ленинградской области

Река Тосна по данным государственного водного реестра России относится к Балтийскому бассейновому округу, речному бассейну – Нева (включая бассейны рек Онежского и Ладожского озера), речном подбассейну – Нева и реки бассейна Ладожского озера (без 01.04.01 и 01.04.02, российская часть бассейнов), водохозяйственный участок – Нева от истока до в/п Новосаратовка.

На притоках реки Невы в разные годы действовало несколько постов, в настоящее время часть из них закрыта

В таблице 1.1 представлена информация о гидрологической изученности реки, в таблице 1.2 – основные гидрографические характеристики.

Ближайшей метеостанцией, на которой ведется полный комплекс метеорологических измерений, является метеостанция Белогорка.

Таблица 1.1 – 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.

Таблица 1.2 – 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

2. Долгосрочный прогноз основных характеристик весеннего стока

Обнаружение и предотвращение наводнений возможны благодаря прогнозу объема и максимума половодья – основным характеристикам весеннего стока. Формирование стока зависит от двух видов факторов - постоянных и переменных. Постоянные факторы определяют характер распределения снега на водосборе, накопление поверхностных вод, инфильтрацию талых вод, скорость стока и время добегания. Они включают в себя размер, структуру и рельеф бассейна, геологическое строение, состав почвогрунтов, растительность, степень озерности, заболоченности, уклон склонов и русел. Кроме того, постоянным фактором является хозяйственная деятельность человека на водосборах и руслах рек.

Переменные величины, такие как запасы снега, интенсивность снеготаяния, влажность и промерзание почвы, а также испарение и осадки, оказывают влияние на объем половодья, сроки его начала и окончания, максимальные расходы и форму гидрографа. На данный момент для долгосрочного прогнозирования весеннего стока используются три метода: расчет по уравнению водного баланса, физико-статистический водно-балансовый и статистические методы [4].

2.1 Расчет по уравнению водного баланса

Расчет весеннего стока является важным этапом при планировании водохозяйственных мероприятий. Для этого используется уравнение (2.1), которое учитывает множество факторов, включая количество осадков и максимальный запас воды в снежном покрове. Однако, при расчете возникают трудности, связанные с определением суммарных потерь талых вод.

$$Y = S + X_1 + X_2 - P, \quad (2.1)$$

где Y – талодождевой сток за половодье;

S – максимальный запас воды в снежном покрове, включая ледяную корку;

X_1 – количество осадков от даты максимального снегозапаса до даты схода снега;

X_2 – количество осадков от даты схода снега до окончания половодья;

P – суммарные потери талых вод.

Исследования показали, что в разных регионах эти потери зависят от разных факторов. Например, в северном регионе они связаны с предвесенней влагонасыщенностью, в южном - с водопроницаемостью почв, а в центральных частях лесостепной зоны - с промерзанием почв.

Учитывая эти факторы, можно точнее определить суммарные потери талых вод и более точно рассчитать весенний сток. При этом, необходимо учитывать, что изменение климата и человеческая деятельность могут оказывать значительное влияние на эти факторы и, следовательно, на водный баланс региона.

Таким образом, для эффективного управления водными ресурсами необходимо проводить мониторинг и исследования с учетом местных особенностей и изменений в окружающей среде.

В процессе прогнозирования весеннего стока используется методика, основанная на уравнении водного баланса. Она включает в себя дифференциальный расчет и прогноз потерь, которые влияют на составляющие весеннего стока. Прогноз стока талых вод разделен на две части - полевую и лесную - и производится по уравнению (2.2).

Уравнение (2.2) включает в себя множество факторов, в том числе потери талых вод на увлажнение почвогрунтов, на пополнение запасов грунтовых и болотных вод, а также суммарное испарение за период формирования

стока талых вод. Важно отметить, что каждый из этих факторов влияет на общий прогноз стока талых вод.

$$Y_{\tau} = (S + \bar{X}_1) - P = (S + \bar{X}_1) - (\Delta W + \Delta W_{\text{гр}} + \Delta W_6 + E), \quad (2.2)$$

где ΔW — потери талых вод на увлажнение почвогрунтов;
 $\Delta W_{\text{гр}}$ и ΔW_6 — потери талых вод на пополнение запасов грунтовых и болотных вод;
 E — суммарное испарение за период формирования стока талых вод.

Основная цель этой методики – предоставить точный и надежный прогноз весеннего стока, что может быть полезно для различных отраслей, включая сельское хозяйство и энергетический сектор. Кроме того, эта методика может помочь в оценке влияния климатических изменений на водный режим рек и озер, что является важной задачей в настоящее время.

Рассмотрим методы расчета затрат воды на увлажнение метрового слоя почвогрунтов. Одним из таких методов является вычисление разности влагозапасов почвы к моменту окончания склонового стока и влагозапасов в почве к началу половодья $W_{\text{нач}}$. Это позволяет определить необходимое количество воды для пополнения запасов грунтовых вод.

Кроме того, для расчета потери талых вод на пополнение запасов грунтовых вод используется формула, основанная на разности между запасом на конец и начало половодья:

$$\Delta W = W_{\text{кон}} - W_{\text{нач}}. \quad (2.3)$$

Такой подход позволяет более точно определить количество воды, необходимое для компенсации потерь.

Однако, для более точного расчета необходимо учитывать и другие факторы. Например, предполагается, что суммарное испарение за период формирования талого стока пропорционально количеству тепла, необходимого для превращения снега в воду. Поэтому, для более точного расчета затрат воды на увлажнение метрового слоя почвогрунтов, необходимо учитывать максимальные снеготопы к началу весны.

Метод формирования общего слоя стока описывается формулой, в которой учитываются три составляющих: устойчивый подземный сток, норма дождевого стока на спаде половодья и технический сток. Однако, чтобы использовать данный метод, требуется обладать определенной дополнительной информацией, а также иметь опыт в прогнозировании, так как возможны ошибки в предсказании.

Преимуществом данного метода является возможность проведения детального анализа физических процессов, которые влияют на формирование весеннего стока. Кроме того, метод позволяет более тщательно изучить уравнение водного баланса, что позволяет более точно прогнозировать изменения уровня воды в реках и других водоемах.

Недостаток метода состоит в его высокой трудоемкости, что означает, что исследователь должен вложить много времени и усилий в проведение исследований. Кроме того, для прогнозирования необходимо знание многих дополнительных факторов, что может быть сложно для некоторых исследователей.

В целом, метод формирования общего слоя стока может быть очень полезным для изучения изменений уровня воды в реках и водоемах. Однако, исследователи должны быть готовы к трудоемкому процессу и иметь достаточное количество информации, чтобы прогнозировать изменения уровня воды с высокой точностью [4].

2.2 Физико-статистический метод долгосрочного прогноза весеннего половодья

Методы прогнозирования имеют важное значение во многих отраслях, включая сельское хозяйство, промышленность и экономику. Физико-статистические методы прогноза, в отличие от других методов, позволяют расширить и упорядочить выбор прогностической информации.

Этот метод имеет четкую физическую основу и базируется на уравнении водного баланса. Однако, он также использует метеорологические данные, что позволяет автоматизировать процесс составления прогноза и уточнить его за счет поступления дополнительной информации.

Основная формула метода прогноза по уравнению водного баланса:

$$Y = X - P, \quad (3.4)$$

где Y – талодождевой сток за период половодья;

P – общая величина потерь стока;

X – общее количество воды, участвующей в формировании стока.

Это уравнение позволяет определить количество воды, необходимой для поддержания баланса в природных системах.

Метод прогноза по уравнению водного баланса может быть применен в различных областях, включая прогнозирование урожаев, планирование водных ресурсов и предсказание погодных условий. Он является эффективным инструментом для принятия важных решений и позволяет получить точную прогностическую информацию для достижения лучших результатов в разных сферах деятельности.

В процессе изучения водных систем часто возникает необходимость определения талодождевого стока за период половодья. Для этого использу-

ются такие показатели, как общая величина потерь стока (P), общее количество воды, участвующей в формировании стока (X) и максимальный запас воды в снежном покрове и ледяной корке (S).

Одним из ключевых шагов в расчетах является определение количества осадков за определенный период времени. При этом учитываются как осадки до даты максимального запаса воды (X_1), так и после даты схода снега до окончания половодья (X_2). Коэффициент (k), близкий по значению к коэффициенту стока дождевых вод в период спада половодья, также играет важную роль в расчетах.

Таким образом, общее количество воды, участвующей в формировании стока (X), можно выразить как сумму максимального запаса воды в снежном покрове и ледяной корке (S), количества осадков за период от даты максимального запаса воды до даты схода снега (X_1) и количества осадков от даты схода снега до окончания половодья (X_2), умноженных на коэффициент (k). Кроме того, весенние осадки приравниваются к средним многолетним значениям, что также учитывается в расчетах.

$$X = S + X_1, \text{ или } X = S + X_1 + kX_2 \quad (3.5)$$

где S — максимальный запас воды в снежном покрове и ледяной корке;

X_1 — количество осадков за период от даты максимального запаса воды до даты схода снега;

X_2 — количество осадков от даты схода снега до окончания половодья;

k — коэффициент, близкий по значению к коэффициенту стока дождевых вод в период спада половодья.

Таким образом, определение тало-дождевого стока за период половодья является сложным и многокомпонентным процессом, который требует учета многих факторов, таких как количество осадков, максимальный запас воды в снежном покрове и ледяной корке, а также коэффициенты, связанные со стоком дождевых вод в период спада половодья.

Расчет водопоглощения и стока — это важный этап при проектировании инфраструктуры и борьбе с наводнениями. Один из способов расчета основывается на теоретической модели Е.Г. Попова. Ее автор выделяет два типа модели: емкостный и инфильтрационно-емкостный.

Емкостный тип модели используется для расчета водопоглощения в полностью водонепроницаемых почвах и бассейнах с близким залеганием водопора. По этому методу, изначально заполняется свободная емкость почвенных пор и понижений микрорельефа, а затем начинается сток. Важным фактором при емкостном расчете является подача воды и распределение свободной емкости в бассейне.

Инфильтрационно-емкостный тип модели более универсальный и используется для расчета водопоглощения в бассейнах с разной проницаемостью почв. При этом способе, вода инфильтрируется в почву и заполняет емкость, а затем начинается сток. Расчет производится с учетом характеристик почвы и климатических условий.

Важно отметить, что модель Е.Г. Попова является теоретической и может содержать неточности. Поэтому рекомендуется проводить расчеты с использованием нескольких методов и учитывать все возможные факторы, влияющие на водопоглощение и сток.

Водоснабжение и управление стоками воды — это важные аспекты жизнедеятельности любого населенного пункта. Моделирование потоков воды — это один из методов, используемых для определения суммарных потерь стока и суммарной подачи воды. Одним из типов таких моделей является модель $P(X, U)$, которая выражается формулой

$$P(X, U) = [1 - \Phi(X, U)]X + A(X, U), \quad (3.6)$$

где $P(X, U)$ — суммарные потери стока;

X — суммарная подача воды;

U – влажность почвы или косвенный показатель увлажнения бассейна;

$\Phi(X, U)$ – действующая площадь в долях единицы;

$A(X, O)$ – слой воды, задержанный на действующей площади, равный количеству воды, затраченной на заполнение свободной емкости.

Однако, существует и другой тип модели - инфильтрационно-емкостный, который формируется превышением интенсивности поступления воды над интенсивностью ее просачивания. Избыток поступившей воды, с площади водосбора такой модели, превышает свободную емкость крупных некапиллярных пор почвы и понижений рельефа. Его также можно использовать для определения потоков воды и управления стоками воды. Важно помнить, что выбор подходящей модели зависит от конкретной ситуации и условий, в которых она будет применяться.

Для расчета суммарных потерь воды в системе необходимо использовать уравнение (3.4), которое учитывает различные параметры. Одним из таких параметров является суммарная подача воды, выраженная в мм. Другим важным параметром является суммарное просачивание, которое также выражается в мм. Относительная действующая площадь, зависящая от избытка воды, также включается в уравнение. Наконец, поверхностное задержание на действующей площади также учитывается.

$$P = (1 - \Phi)(X - I) + A, \quad (3.4)$$

где X – суммарная подача воды, мм;

I – суммарное просачивание (инфильтрация), мм;

Φ – относительная действующая площадь, зависящая от избытка воды ($X - I$);

A – поверхностное задержание на действующей площади, мм.

Однако, необходимыми условиями для применения этого уравнения являются равномерное поступление по площади и просачивание воды. Важно помнить, что расчет стока производится по формулам (3.5), (3.6) из-за отсутствия возможности прогнозирования средней интенсивности инфильтрации талой воды в мерзлую почву и продолжительности снеготаяния.

$$Y = X - E(U)\{(1 - \exp)\left[-\frac{X}{E(U)}\right]\}, \quad (3.7)$$

$$Y = X - E(U)th\left[\frac{X}{E(U)}\right], \quad (3.8)$$

в этом уравнение

X — общее количество поступившей воды, мм;

$E(U)$ — максимальная свободная емкость в бассейне как функция показателя предшествующего увлажнения U , мм;

th — знак гиперболического тангенса.

Чтобы понять, как работает уравнение (3.4), необходимо разобраться в каждом из его компонентов. Например, суммарная подача воды может быть увеличена путем увеличения площади, на которой происходит поступление воды. Суммарное просачивание, с другой стороны, может быть увеличено путем увеличения количества воды, которое просачивается через почву. И так далее.

В целом, уравнение (3.4) может быть очень полезным инструментом для расчета суммарных потерь воды в системе. Однако, для его правильного применения необходимо учитывать множество факторов и условий, чтобы получить точные результаты.

Показатель водопоглотительной способности бассейна и количество поступившей воды — это главные факторы, которые влияют на физико-статистическую зависимость стока. Это значит, что количество воды, которая поступает в бассейн, и то, сколько воды уходит в потери, имеют решающее значение для определения стока.

Если говорить более подробно о водопоглотительной способности бассейна, то это показатель, который характеризует способность почвы и грунта впитывать и удерживать воду. Он зависит от многих факторов, таких как тип грунта, наличие растительности и т.д. Чем выше показатель водопоглотительной способности, тем меньше потери стока и, следовательно, тем выше будет сток воды.

Однако, не стоит забывать и о количестве поступившей воды. Если количество воды, которая поступает в бассейн, очень мало, то и сток будет невелик. И наоборот, при большом количестве воды, сток будет значительно выше.

Таким образом, для определения стока важно учитывать все факторы, которые влияют на его формирование, включая количество поступившей воды и показатель водопоглотительной способности бассейна.

2.3 Статистические методы

Статистический прогноз весеннего стока и его составляющих выполняется методом экстраполяции, основанном на наблюдениях прошлых лет. Для этого необходимо, чтобы ландшафт и климат оставались существенно неизменными в течение 30-40 лет. Статистический метод анализирует физико-географические условия формирования стока. Однако, результаты могут быть неудовлетворительными, если не соблюдаются некоторые условия. Важно учитывать, что сопоставляемые переменные должны подчиняться нормальному закону распределения и связи рассматриваемых переменных должны быть линейными.

В настоящее время при ограниченности данных наблюдений и их невысокой точности статистические методы широко используются для прогнозирования. В таких случаях, когда прогноз по уравнению водного баланса невозможен, прогноз выполняют на основе регрессионного или дискриминантного анализа, а также эмпирических зависимостей. Для долгосрочного прогнозиро-

вания сезонного стока с большой заблаговременностью предложен метод, базирующийся на отыскании внутрирядной корреляции и цикличности во временных рядах стока, так как часто отсутствует или имеет незначительную корреляцию между рядами переменных и необходимо значительное превышение объема выборки над числом независимых переменных. Иногда физическая сущность устанавливаемых зависимостей не раскрывается.

В практике статистических прогнозов применяют различные методы. Один из них – разложение полей метеорологических величин по естественным ортогональным составляющим или функциям. Этот метод широко распространен. Другой метод – дискриминантный анализ, который используется для выявления составляющих метеорологических величин, связанных с прогнозируемым явлением.

Ю.М. Алехин предложил динамико-статистический метод долгосрочного прогнозирования сезонного и годового стока. Этот метод основан на использовании автокорреляционной функции для описания внутрирядной связи последовательности значений прогнозируемой величины во времени. Его большой плюс – заблаговременность прогноза.

Для поиска многофакторных регрессионных связей также используются различные методы. Особое внимание уделяется установлению корреляционных связей между предшествующими характеристиками атмосферной циркуляции и стоком. Но полученные зависимости не всегда являются устойчивыми и могут не выдерживать испытания временем [4].

3. Исходные данные

3.1 Объект исследование

Объектом исследования была выбрана р. Тосна в районе города г. Тосно. Данный участок реки выбран в связи с тем обстоятельством, что практически ежегодно при весеннем подъеме уровней воды наблюдается затопление и подтопление территории города и ближайших садоводств. Так, например, согласно данным открытых источников [13], 27 марта 2023 появились первые сообщения что река начала выходить из берегов. Причиной стали дождевые паводки, наложившиеся на подъем половодья. По состоянию на 27 марта уровень воды в реке Тосна составил 534 сантиметра при отметке начала подтопления в 530 сантиметров. На рисунке 3.1 представлено фото затопленного частного сектора.



Рисунок 3.1 – Затопление частного сектора в г. Тосно в марте 2023 г.

В районе города вода поднимается как в самой реке Тосна, так и на ее притоках – Смолянном и безымянном ручье. Река существенно разливается в берегах. При этом в русле реки наблюдаются еще и ледяные заторы. Деревья,

которые до того стояли далеко на берегу, уходят под воду. Например, у дома №19 по Гражданской набережной вода перекрыла дорогу – по набережной теперь проедет разве что трактор или же внедорожник с высокой посадкой (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Затопленные набережные р. Тосна в марте 2023 года

Река Тосна на своем пути проходит через три района Ленинградской области: Кировский, Тосненский и Лужский (рисунок 3.3). Длина реки составляет 121 км. Исток реки Тосна располагается в деревне Поддубье, а устье – река Нева.

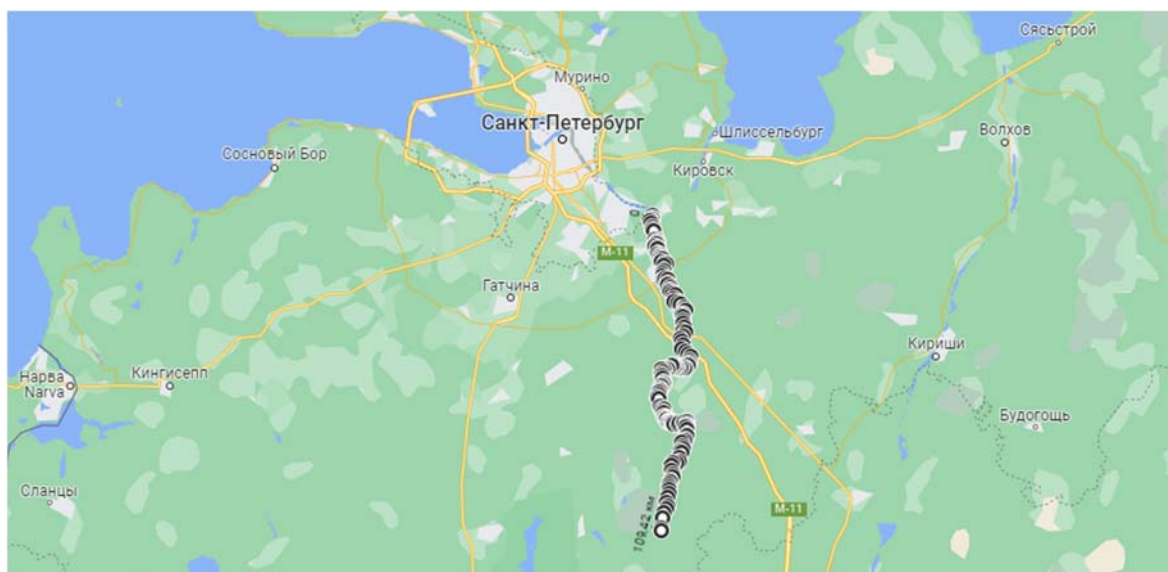


Рисунок 3.1 – Расположение р. Тосна на карте

Рассматриваемый участок реки расположен на плоской, однообразной равнине, сложенной известняками, перекрытыми слоем суглинков, песков и глин, поросшую смешанным лесом и кустарником, вблизи поста в г. Тосно занятую различного рода постройками и огородами. Долина реки здесь неясно выражена, с невысокими пологими склонами, сливающимися с окружающей местностью. В 80 м ниже поста при уровне 550 см над нулем поста затопляется правобережная пойма. Русло извилистое, песчано-гравелистое, с наличием валунов, сильно зарастающее вдоль берегов водной растительностью. Высокие, крутые, местами обрывистые берега поросли травяной растительностью, местами подвержены оползанию.

Пост находится в 0.5 км от станции, в 0.6 км ниже устья руч. Андреев. В отдельные годы ниже поста наблюдаются небольшие заторы льда и зажоры.

Пост расположен на левом берегу, в 75 м ниже железнодорожного моста и состоит из свай и реперов. Высота Балтийской системы реперами поста передана нивелировкой IV класса 1954 года и уточнена в 1983 году. Отметка нуля поста 24.69 м БС.

3.2 Сбор и обработка исходных данных

Сток за половодье

Для прогноза максимальных расходов воды за период весеннего половодья необходимы данные максимальных расходов воды за год, слой стока половодья, которые собраны из гидрологических ежегодников до 2008 года, а с 2008 по 2020 с автоматизированной информационной системой государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [6]. По итогам собранных данных составлена таблица 3.1.

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

Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$
1944	24.04	65.8	—	1983	05.04	177	—
1945	28.04	52.4	—	1984	10.04	136	—
1946	26.04	151	203	1985	25.04	114	—
1947	15.05/20.04	67.9/67.6	147	1986	—	106	—
1948	12.04	147	257	1987	03.05	102	—
1949	10.04	74.8	153	1988	—	110	—
1950	18.11/25.04	67.2/54.0	215	1989	—	61.7	—
1951	17.04	127	180	1990	—	120	—
1952	17.08	88.3	—	1991	—	120	—
1953	10,11.04	97.4	276	1992	—	88.3	—
1954	06.05	36.0	135	1993	09.04	54.3	—
1955	3,4.05	185	232	1994	09.04	94.3	—
1956	3,4.05	181	169	1995	22.04	132	—
1957	27.04	125	293	1996	25.04	71	—
1958	05.05	121	288	1997	60.04	69.2	—
1959	18.04	177	225	1998	25.04	141	—
1960	18.04	114	171	1999	—	135	—
1961	19,20.04	79.8	208	2000	15.04	83.9	—
1962	15,16.04	176	394	2001	11.04	104	—
1963	21.04	84.2	—	2002	02.04	65.6	—
1964	21.04	94.6	—	2003	12.01	70.8	—
1965	25.04	130	—	2004	13.04	97.4	—
1966	02.05	206	—	2005	13.04	150	—
1967	12.04	96	103	2006	14.04	61.8	—
1968	07.04	86.4	124	2007	13.01	67.1	—
1969	22.04	104	112	2008	12.04	102	—

Продолжение таблицы 3.1

Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$
1970	24.04	83.3	123	2009	18.04	77.3	—
1971	13.04	126	212	2010	12.04	173	—
1972	18.04	103	108	2011	21.04	136	—
1973	12.04	18.8	65	2012	20.04	95.4	—
1974	09.05	69.2	276	2013	21.04	161	—
1975	09.04	65.4	149	2014	15.05	31.1	—
1976	19,20.04	92.5	—	2015	18.04	65.6	—
1977	—	103	—	2016	25.11	76.8	—
1978	—	130	—	2017	27.04	71.2	—
1979	29.04	87.3	—	2018	19.04	135	—
1980	27.04	132	—	2019	03.04	107	—
1981	—	137	—	2020	07.03	74.2	—
1982	11.04	135	—	—	—	—	—

Отсутствие данных слоя стока половодья восполнялись вручную. По ежедневным данным среднесуточных расходов воды построены гидрографы за каждый год. По гидрографу определены даты весеннего половодья. За данный период усреднили среднесуточный расход воды. Далее 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.

Площадь водосбора реки Тосна составляет 1300 км².

После обработки недостающих данных составлена таблица 3.2.

Таблица 3.2 — Исходные данные после расчета слоя стока половодья

Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$
1944	24.04	65.8	—	1983	05.04	177	113
1945	28.04	52.4	—	1984	10.04	136	119
1946	26.04	151	203	1985	25.04	114	117
1947	15.05/20.04	67.9/67.6	147	1986	—	106	—
1948	12.04	147	257	1987	03.05	102	149
1949	10.04	74.8	153	1988	—	110	—
1950	18.11/25.04	67.2/54.0	215	1989	—	61.7	—
1951	17.04	127	180	1990	—	120	—
1952	17.08	88.3	—	1991	—	120	—
1953	10,11.04	97.4	276	1992	—	88.3	—
1954	06.05	36.0	135	1993	09.04	54.3	98.9
1955	3,4.05	185	232	1994	09.04	94.3	100
1956	3,4.05	181	169	1995	22.04	132	215
1957	27.04	125	293	1996	25.04	71	88.5
1958	05.05	121	288	1997	60.04	69.2	142
1959	18.04	177	225	1998	25.04	141	123
1960	18.04	114	171	1999	—	135	—
1961	19,20.04	79.8	208	2000	15.04	83.9	92.0
1962	15,16.04	176	394	2001	11.04	104	93.0
1963	21.04	84.2	—	2002	02.04	65.6	91.1
1964	21.04	94.6	—	2003	12.01	70.8	57.8
1965	25.04	130	113	2004	13.04	97.4	130
1966	02.05	206	233	2005	13.04	150	125
1967	12.04	96	103	2006	14.04	61.8	78.3
1968	07.04	86.4	124	2007	13.01	67.1	54.0
1969	22.04	104	112	2008	12.04	102	122
1970	24.04	83.3	123	2009	18.04	77.3	74.3

Продолжение таблицы 3.2

Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$
1971	13.04	126	212	2010	12.04	173	178
1972	18.04	103	108	2011	21.04	136	170
1973	12.04	18.8	65.0	2012	20.04	95.4	95.9
1974	09.05	69.2	276	2013	21.04	161	115
1975	09.04	65.4	149	2014	15.05	31.1	58.7
1976	19,20.04	92.5	113	2015	18.04	65.6	85.9
1977	—	103	—	2016	25.11	76.8	81.5
1978	—	130	—	2017	27.04	71.2	28.8
1979	29.04	87.3	134	2018	19.04	135	42.1
1980	27.04	132	103	2019	03.04	107	35.8
1981	—	137	—	2020	07.03	74.2	137.6
1982	11.04	135	141	—	—	—	—

Запас воды в снежном покрове

Для определения максимальных запасов воды в снежном покрове были использованы данные по полевым и снегомерным маршрутам по метеостанции Белогорка. В работе использовались данные массива «Маршрутные снегомерные съемки» [14]. Массив включает характеристики снежного покрова по данным маршрутных снегомерных съемок, проводимых по регламенту маршрутных снегосъемок через каждые 10 дней в течение холодного периода (каждые пять дней в период интенсивного снеготаяния). Данные включают сведения по снегосъемке отдельно для трех типов ландшафта: поле, лес и овраги. 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.

Условия накопления снега в лесу и поле неодинаковы, как вследствие разного испарения, так и в результате оттепелей. Существенные различия снегозапасов наблюдаются в полях из-за ветрового переноса. 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. Эти средние многолетние соотношения справедливы для любых районов лесной зоны с длиной открытых склонов от 300 до 800 метров. В тальвегах логов запасы воды в снеге примерно соответствуют снегозапасам нижних частей склонов. Суммарный запас воды в снеге на открытых участках примерно равен снегозапасам средних частей склонов [15].

В таблице 3.3 приведены данные о максимальных запасах воды в снежном покрове, а также статистические характеристики рядов.

Таблица 3.3 – 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

Продолжение таблицы 3.3

Год	Запас воды, общий		Суммарный запас воды
	поле	лес	
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
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

Продолжение таблицы 3.3

Год	Запас воды, общий		Суммарный за- пас воды
	поле	лес	
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
2019/20	6	6	6
Scp	94	82	85
Smax	211	186	185
Smin	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 3.4.

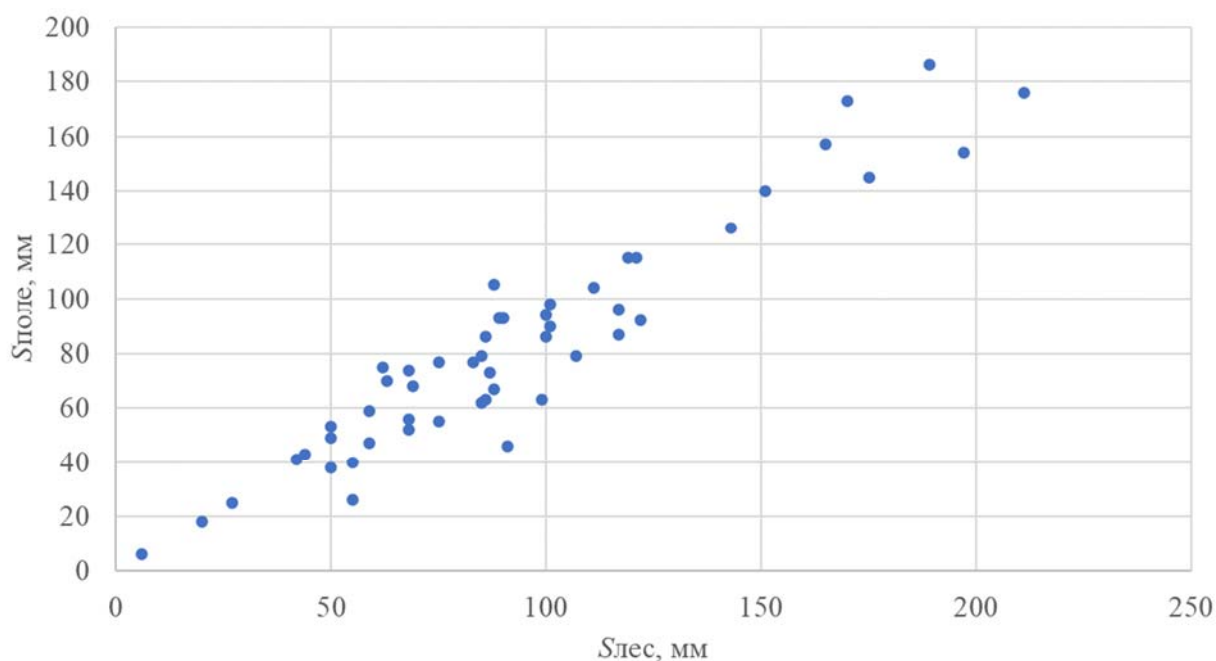


Рисунок 3.4 – Зависимость максимальных запасов воды в снежном покрове в лесу и в поле

Осадки периода снеготаяния и половодья

Также для дальнейших расчетов необходимы метеорологические данные. Так как вблизи гидрологического поста отсутствуют метеорологическая станция, то для расчетов была выбрана ближайшая станция Белогорка. Данные брались с сайта Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [7]. В качестве исходных данных использовались ежедневные средние температуры воздуха, количество осадков и высота снежного покрова.

Твердые и жидкие осадки, выпадающие в период формирования половодья, оказывают большее или меньшее влияние на объем стока в зависимости от их количества и времени выпадения.

Условия стекания осадков, выпадающих на поверхность тающего снега или только что освободившуюся от снега почву, близки к условиям стекания талых вод. В существенно иных условиях водопоглощения формируется дождевой сток от осадков, выпадающих на уже оттаявшую почву после схода

снега. Поэтому количество осадков, выпавших в период таяния снежного покрова и позже, целесообразно подсчитывать отдельно для указанных периодов.

При построении прогностических зависимостей осадки, выпадающие на водосбор после формирования максимума снеготаяния и до конца снеготаяния, непосредственно прибавляются к запасам воды в снежном покрове, так как условия их поглощения близки к условиям потерь талых вод. В отличие от них осадки, выпадающие на водосбор после схода снежного покрова, прибавляются к снеготаянию умноженным на некоторый коэффициент меньше единицы, учитывающий различие в условиях поглощения и потерь осадков

Снеготаяние начинается с переходом температуры воздуха через 0°C . Поэтому дату его начала можно определить по метеорологическим данным.

По исходным метеорологическим данным построены хронологические графики хода температур воздуха за каждый год. Исходные данные были собраны с 1966 по 2020 год. Определены максимальная высота снежного покрова и дата схода снега (таблица 3.4).

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
1966	02.05	206	233	18.02	80	29.04
1968	07.04	86.4	124	16.03	57	12.04
1969	22.04	104	112	10.03	67	16.04
1971	13.04	126	212	11.03	70	24.04
1972	18.04	103	108	25.01	21	08.04
1976	19,20.04	92.5	113	26.03	78	03.05
1979	29.04	87.3	134	14.02	76	17.04
1980	27.04	132	103	04.03	55	15.04

Продолжение таблицы 3.4

Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Дата макс. вы- соты снеж. по- крова	Макс. вы- сота снеж. покр.	Дата схода снега
1982	11.04	135	141	11.02	71	21.04
1983	05.04	177	113	08.03	37	16.04
1984	10.04	136	119	10.02	75	12.04
1985	25.04	114	117	13.03	48	17.04
1987	03.05	102	149	04.03	51	14.04
1993	09.04	54.3	98.9	22.02	21	14.04
1994	09.04	94.3	100	25.02	33	06.04
1995	22.04	132	215	11.02	52	16.04
1996	25.04	71.0	88.5	02.04	44	26.04
1998	25.04	141	123	08.02	38	19.04
2000	15.04	83.9	92.0	05.02	27	07.04
2001	11.04	104	93.0	07.03	37	17.04
2002	02.04	65.6	91.1	01.01	46	19.04
2003	12.01	70.8	57.8	15.02	36	10.04
2004	13.04	97.4	130	18.02	43	10.04
2005	13.04	150	125	20.03	38	05.04
2006	14.04	61.8	78.3	01.03	40	11.04
2007	13.01	67.1	54.0	02.03	28	14.03
2008	12.04	102	122	26.03	20	04.04
2009	18.04	77.3	74.3	21.03	24	10.04
2010	12.04	173	178	14.03	84	07.04
2011	21.04	136	170	27.02	71	17.04
2012	20.04	95.4	95.9	12.03	36	16.04
2013	21.04	161	115	21.02	46	18.04

Продолжение таблицы 3.4

Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Дата макс. вы- соты снеж. по- крова	Макс. вы- сота снеж. покр.	Дата схода снега
2014	15.05	31.1	58.7	21.03	14	23.03
2015	18.04	65.6	85.9	08.02	45	21.04
2016	25.11	76.8	81.5	19.01	24	15.03
2017	27.04	71.2	28.8	27.02	20	25.04
2018	19.04	135	42.1	19.02	28	07.04
2019	03.04	107	35.8	08.02	54	12.04
2020	07.03	74.2	137.6	27.02	12	03.03

Для дальнейших расчетов определены суммы осадков за период от даты максимальной высоты снежного покрова до даты схода снега (период весеннего половодья, сформированный снегозапасами) и сумма осадков за период от даты схода снега до даты окончания половодья (период, сформированный осадками). В таблицу 3.5 внесены суммы осадков. По итогу обработки исходных данных период составил 39 лет.

Таблица 3.5 — Суммы осадков, формирующие весеннее половодье

№ п/п	Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Дата макс. высоты снеж.покр.	Макс. высота снеж. покр.	Дата схода снега	Дата начала по- ловодья	Дата оконча- ния полово- дья	$\sum X_{\text{снег}}$	$\sum X_{\text{жид.осад}}$	$X_1+0.5X_2$
1.	1966	02.05	206	233	18.02	80	29.04	01.04	27.05	151.4	19.2	161
2.	1968	07.04	86.4	124	16.03	57	12.04	22.03	09.06	61.0	50.9	86.45
3.	1969	22.04	104	112	10.03	67	16.04	09.04	19.06	39.0	103.9	90.95
4.	1971	13.04	126	212	11.03	70	24.04	22.03	10.06	92.7	93.7	139.55
5.	1972	18.04	103	108	25.01	21	08.04	20.03	11.06	41.5	36.9	59.95
6.	1976	19,20.04	92.5	113	26.03	78	03.05	29.03	29.05	61.0	5.1	63.55
7.	1979	29.04	87.3	134	14.02	76	17.04	28.03	28.05	30.1	56.4	58.3
8.	1980	27.04	132	103	04.03	55	15.04	04.04	11.06	20.4	56.2	48.5
9.	1982	11.04	135	141	11.02	71	21.04	25.03	13.05	53.7	11	59.2
10.	1983	05.04	177	113	08.03	37	16.04	24.03	28.04	84.7	0.0	84.7
11.	1984	10.04	136	119	10.02	75	12.04	30.03	06.05	27.1	5.8	30
12.	1985	25.04	114	117	13.03	48	17.04	08.04	25.05	30.5	44.6	52.8
13.	1987	03.05	102	149	04.03	51	14.04	04.04	28.05	23.5	91	69
14.	1993	09.04	54.3	98.9	22.02	21	14.04	15.03	27.05	50.2	32.9	66.65
15.	1994	09.04	94.3	100	25.02	33	06.04	31.03	20.05	57.0	32.6	73.3
16.	1995	22.04	132	216	11.02	52	16.04	17.02	15.06	110.2	141.2	180.8

Продолжение таблицы 3.5

№ п/п	Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Дата макс. высоты снеж.покр	Макс. высота снеж. покр.	Дата схода снега	Дата начала половодья	Дата оконча- ния полово- дья	$\sum X_{\text{снег}}$	$\sum X_{\text{жид.осад}}$	$X_1+0.5X_2$
17.	1996	25.04	71.0	88.5	02.04	44	26.04	09.04	16.06	36.0	105.1	88.55
17.	1998	25.04	141	123	08.02	38	19.04	30.03	23.05	109.5	27.7	123.35
18.	2000	15.04	83.9	92.0	05.02	27	07.04	29.02	24.05	81.7	29.9	96.65
19.	2001	11.04	104	93.0	07.03	37	17.04	31.03	13.05	55.5	28.6	69.8
20.	2002	02.04	65.6	91.1	01.01	46	19.04	19.03	07.05	150.4	11.5	156.15
21.	2003	12.01	70.8	57.8	15.02	36	10.04	11.04	30.05	38.2	110.8	91.9
22.	2004	13.04	97.4	130	18.02	43	10.04	19.03	13.05	56.0	3.0	57.5
23.	2005	13.04	150	125	20.03	38	05.04	03.04	31.05	0.2	121.4	60.9
24.	2006	14.04	61.8	78.3	01.03	40	11.04	08.03	29.05	47.3	42.4	68.5
25.	2007	13.01	67.1	54.0	02.03	28	14.03	29.03	13.05	24.1	51	49.6
26.	2008	12.04	102	122	26.03	20	04.04	29.03	14.05	9.8	52.5	36.05
27.	2009	18.04	77.3	74.3	21.03	24	10.04	28.03	14.05	25.2	7.2	28.8
28.	2010	12.04	173	178	14.03	84	07.04	28.03	16.05	38.3	38.2	57.4
29.	2011	21.04	136	170	27.02	71	17.04	03.04	18.05	41.9	4.6	44.2
30.	2012	20.04	95.4	95.9	12.03	36	16.04	06.04	19.05	45.2	38.4	64.4
31.	2013	21.04	161	115	21.02	46	18.04	10.04	09.06	28.5	94.7	75.85

Продолжение таблицы 3.5

№ п/п	Год	Дата	$Q_{\max}$	$Y_{\text{пол}}$	Дата макс. высоты снеж.покр	Макс. высота снеж. покр.	Дата схода снега	Дата начала половодья	Дата окон- чания поло- водья	$\sum X_{\text{снег}}$	$\sum X_{\text{жид.осад}}$	$X_1+0.5X_2$
32.	2014	15.05	31.1	58.7	21.03	14	23.03	08.03	27.05	4.5	58.9	33.95
33.	2015	18.04	65.6	85.9	08.02	45	21.04	28.03	11.06	57.1	95.8	105
34.	2016	25.11	76.8	81.5	19.01	24	15.03	28.03	20.05	87.0	103.5	138.75
35.	2017	27.04	71.2	28.8	27.02	20	25.04	17.03	29.05	104.4	23.8	116.3
36.	2018	19.04	135	42.1	19.02	28	07.04	03.04	19.05	41.8	50.2	66.9
37.	2019	03.04	107	35.8	08.02	54	12.04	16.03	19.05	77.4	48.8	101.8
38.	2020	07.03	74.2	137.6	27.02	12	03.03	09.02	04.06	7.0	144.1	79.05

4. Прогноз стока весеннего половодья

4.1 Прогноз стока весеннего половодья физико-статистическим методом

Наиболее сложной для определения составляющей водного баланса речного бассейна за период половодья являются потери талых вод. Сочетание постоянных (влагоемкость почв) и переменных факторов (метеорологические условия осенне-зимнего периода) создают большую изменчивость потерь талых вод как по площади лесных и открытых участков, так и во времени, от года к году.

К началу зимы одинаковые по механическому составу почвы в лесу и поле имеют ежегодно примерно равную увлажненность. Однако к концу зимы увлажненность почв в лесу обычно меньше, чем в поле на 5 – 50 мм. Это обуславливает существенные различия в потерях талых вод в лесу и в поле.

В первые месяцы зимы промерзание почв в поле происходит более интенсивно, чем в лесу, поэтому в поле избыточная влага в почве, не успевая просочиться вглубь, замерзает. Одновременно развивается процесс восходящей миграции влаги.

В лесу миграция влаги явление редкое из-за крупнопористой структуры верхних горизонтов почв и незначительного промерзания их в начале зимы, вследствие чего избыток осенней влаги из верхних слоев успевает просочиться вниз. Поэтому к концу зимы увлажненность почв в лесу часто не превышает значений наименьшей влагоемкости, а в поле часто наблюдается перенасыщение влагой промерзших почв в результате миграции и оттепелей. Весной, при оттаивании, перенасыщенные почвы отдают избыток влаги на сток и питание грунтовых вод.

Однако в года, когда с осени почвы были весьма сухими (меньше 0.75 наименьшей влагоемкости в верхнем 5-сантиметровом слое), процессы миграции влаги не развиваются и к концу зимы может наблюдаться равенство запасов на открытых и лесных участках.

Для большинства водосборов лесной зоны испарение и потери на пополнение запасов грунтовых вод на открытых и залесенных участках близки между собой. Различия же в потерях на увлажнение почв велики, что определяется различиями в снегозапасах и потерях на увлажнение почв.

Наибольшее различие в стоке талых вод с леса и поля следует ожидать в годы, когда в конце зимы почвы в поле содержат избыточную влагу, а в лесу увлажненность почв приближается к значениям наименьшей влагоемкости.

Зимние оттепели существенно (до 40 – 70 мм) увеличивают разницу в снегозапасах в лесу и в поле, вследствие чего в отдельные годы весенний сток с леса бывает больше, чем с поля.

В северо-западном районе Европейской территории России весенний сток с леса равен в среднем стоку с поля. Число случаев с превышением стока с поля над стоком в леса почти равно числу случаев с обратным соотношением [15].

В данной работе для прогноза использовалась зависимость (3.6). В качестве показателя водопоглотительной способности бассейна был принят наименьший расход за октябрь.

В качестве исходных данных взяты слой стока, максимальные запасы воды в снежном покрове, количество осадков за половодье и расход воды в межень (октябрь).

В таблице 4.1 исходные данные для прогноза.

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения поверочного прогноза физико-статистическим методом

Год	Исходные данные				S+X _B	P ₀
	Y, мм	S, мм	X _B , мм	Q _X , мм		
1966	233	183	161	5.66	344	110
1968	124	98	86.45	3.53	184	60
1976	113	151	63.55	1	215	110
1979	134	141	58.3	2.22	199	65
1980	103	100	48.5	1.8	149	50
1982	141	157	59.2	1.68	216	74
1983	113	68	84.7	0.77	153	38
1984	119	163	30	3.13	193	72
1985	117	98	52.8	5.55	151	30
1987	149	115	69	4.12	184	40
1993	98.9	58	66.65	0.83	125	25
1994	100	91	73.3	3.83	164	65
1995	216	89	180.8	0.16	270	50
1996	88.5	68	88.55	0.18	157	70
1998	123	85	123.35	1.87	208	86
2000	92.0	43	96.65	2.56	140	50
2001	93.0	55	69.8	0.39	125	40
2002	91.1	71	156.15	0.086	227	155
2003	57.8	72	91.9	4.24	164	117
2004	130	76	57.5	5.5	134	10
2005	125	71	60.9	0.053	132	20
2006	78.3	78	68.5	0.32	147	75
2007	54.0	43	49.6	0.22	93	40
2009	74.3	68	28.8	5.09	97	20
2010	178	171	57.4	1.16	228	44

Для прогноза необходимо воспользоваться номограммами зависимости $P_0 = f(S + X)$. Для выпуска прогноза была построена зависимость, приведенная на рисунке 4.1

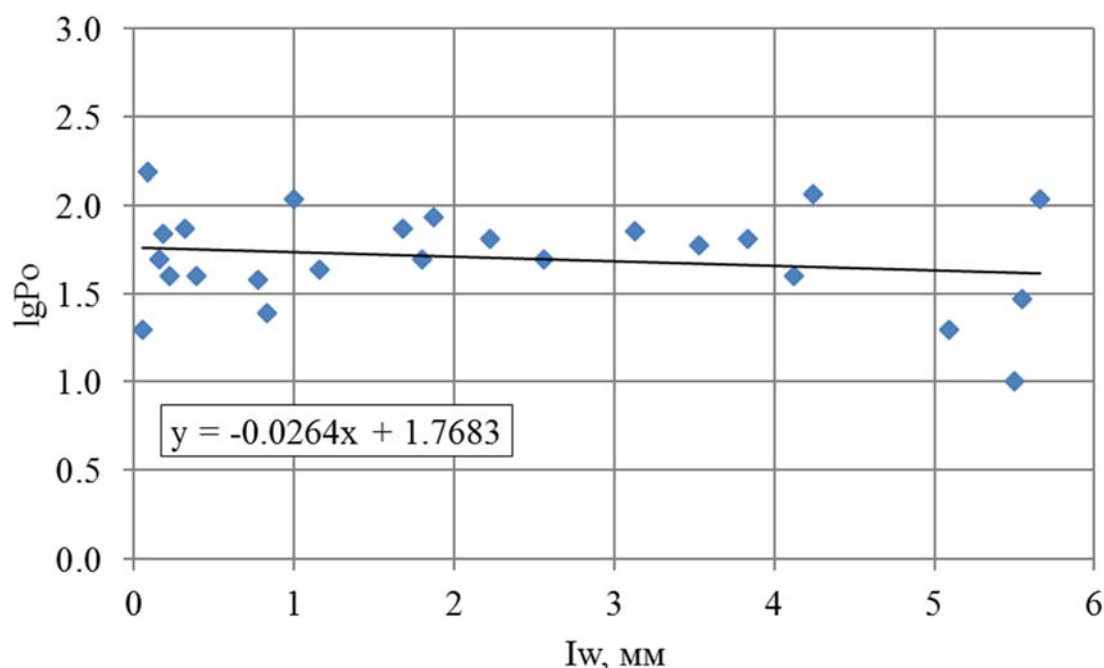


Рисунок 4.1 – Прогностическая зависимость

В Приложении А приведены результаты поверочных прогнозов на зависимом материале.

4.2 Прогноз стока весеннего половодья статистическим методом

Методы статистического прогноза предполагают возможность оценки будущего значения процесса по прошлым и текущим данным наблюдений и определяющим факторов. Если за используемый интервал времени условия формирования стока существенно не менялись, для оценки связей применяется метод множественной линейной корреляции, который позволяет оценить влияние каждого параметра и суммарный эффект.

Набор предикторов для разработки методики прогноза стока половодья осуществляется их физических соображений. В качестве факторов, формиру-

ющих весенний сток, использованы те же характеристики, что и при разработке методики прогнозирования физико-статистическим воднобалансовым методов.

К таким факторам относятся: максимальные снегозапасы, характеризующие поступление на водосбор талой воды; сумму осадков от даты максимального снегозапаса до окончания половодья, отражающие дополнительное поступление воды после формирования максимума снегозапасов, расходы воды, косвенно характеризующие увлажнение бассейна

Весовые коэффициенты каждого из этих предикторов определены на основе множественной корреляции со слоем стока весеннего половодья. С целью подбора более эффективного уравнения были использованы различные вариации предикторов за период с 1966 по 2010 год. В результате для прогноза весеннего стока получен ряд уравнений, вид которых и их оценка приведены в таблице 4.2. Прогноз на зависимом материале представлены в Приложение Б.

Таблица 4.2 — Прогностические зависимости для слоя стока весеннего половодья

№ п/п	Вид зависимости	R	S/σ	Оправ- дывае- мость	Эффективность методики
1	$Y = 1.20S + 4.36Q_x + 0.53X + 10.4$	0.76	0.67	63%	Эффективна
2	$Y = 1.38S + 2.18Q_x + 48.6$	0.61	0.80	59%	Эффективна
3	$Y = 1.21S + 0.48X + 22.7$	0.74	0.68	56%	Эффективна
4	$Y = 4.70Q_x + 0.63X + 60.5$	0.54	0.84	63%	Не эффективна
5	$Y = 2.08Q_x + 116.6$	0.09	1.00	59%	Не эффективна
6	$Y = 0.58X + 74.3$	0.52	0.85	50%	Не эффективна
7	$Y = 1.38S + 53.4$	0.60	0.80	56%	Эффективна

Результат прогностической зависимости показал, что наиболее эффективными методиками являются зависимости от максимальной высоты снега,

расходов воды в меженный период и количества выпавших осадков. На рисунке 4.1 представлен результат данной проверки прогноза.



Рисунок 4.1 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости

$$Y = f(S, Q_x, X)$$

Зависимость от максимальной высоты снега и осадков без учета увлажнения дает результат хуже. Учет увлажнения почвы компенсирует завышенный слой стока.

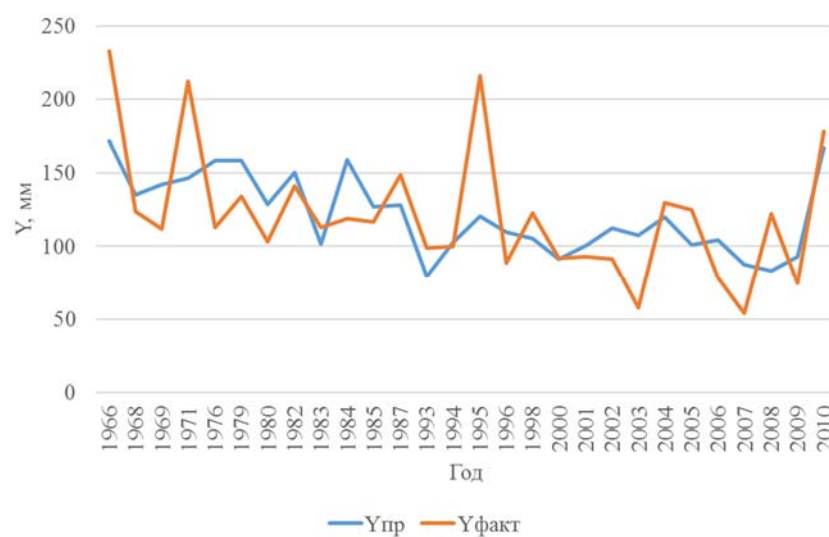


Рисунок 4.2 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(S, X)$

Далее производим прогноз на независимом материале с 2011 по 2020 год, а также оценку эффективности методики (Приложение В).

Таблица 4.3 — Прогностические зависимости для слоя стока весеннего половодья на независимом материале

№ п/п	Вид зависимости	S/σ	Оправдыва- емость	Эффективность методики
1	$Y = 1.20S + 4.36Q_X + 0.53X + 10.4$	0.82	60	Эффективна
2	$Y = 1.38S + 2.18Q_X + 48.6$	0.40	100	Эффективна
3	$Y = 1.21S + 0.48X + 22.7$	0.76	80	Эффективна
4	$Y = 4.70Q_X + 0.63X + 60.5$	1.74	60	Не эффективна
5	$Y = 2.08Q_X + 116.6$	1.62	40	Не эффективна
6	$Y = 0.58X + 74.3$	1.32	60	Не эффективна
7	$Y = 1.38S + 53.4$	1.68	0	Не эффективна

Провели исследование зависимости слоя стока от минимального расхода воды за февраль. Корреляция между стоком половодья и расходом не значима, следовательно, практически не влияет на результат.

Таблица 4.4 — Прогностические зависимости для слоя стока весеннего половодья с минимальным расходом воды за февраль

№ п/п	Вид зависимости	R^2	R	S/σ	Эффективность методики
1	$Y = 0.97S - 2.84Q_{II} + 0.43X + 43.7$	0.43	0.65	1.03	Не эффективна
2	$Y = 1.19S - 5.53Q_{II} + 70.2$	0.30	0.54	1.01	Не эффективна
3	$Y = 1.87Q_{II} + 0.56X + 79.2$	0.25	0.50	1.01	Не эффективна
4	$Y = -5.31Q_{II} + 127.1$	0.01	0.10	1.00	Не эффективна

5. Прогноз максимальных расходов

Водный режим реки Тосна характеризуется большой амплитудой колебания максимальных расходов воды (смотри рисунок 5.1). 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 $206 \text{ м}^3/\text{с}$.

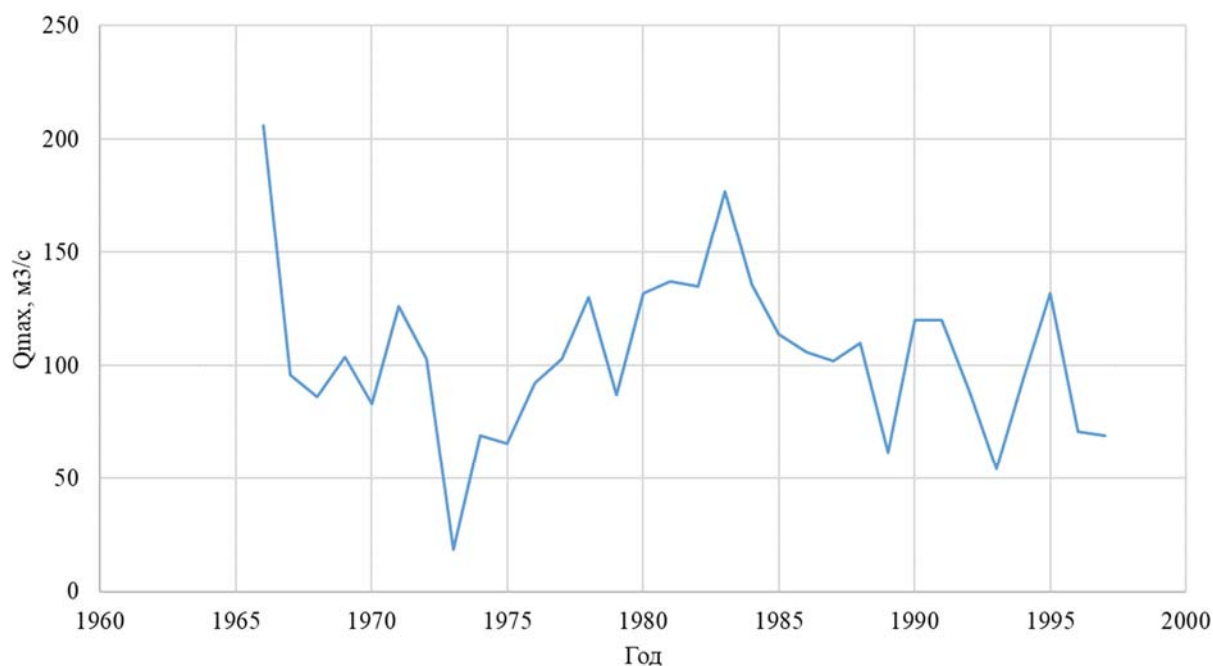


Рисунок 5.1 – график максимальных расходов воды на р. Тосна – г. Тосно

Для разработки методики прогнозирования максимальных расходов была использована их графическая зависимость от слоя стока за период половодья за период с 1966 по 2010 год, представленная на рисунке 5.2. Результаты прогнозов представлены в таблицах 5.1, 5.2. Оценка погрешностей прогнозов выполнена для двух вариантов – по фактическим и ожидаемым значениям слоя

стока половодья и приведена в таблице 5.3. В качестве прогнозируемых величин слоя использованы его значения, полученные статистическим методом по зависимости

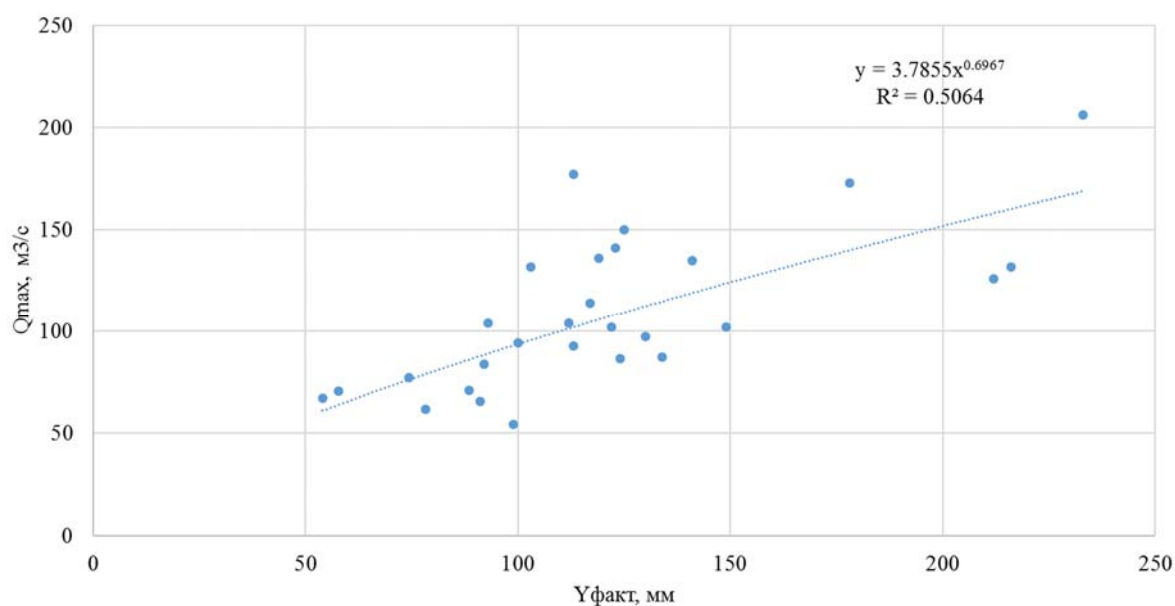


Рисунок 5.1 – Зависимость $Q_{max} = f(Y_{факт})$

Таблица 5.1 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Q_{max} = f(Y_{факт})$ на зависимом материале с фактическими слоями стока

Год	$Y_{факт}$	Q_{max}	Q_{max} рас- четное	ΔQ_{max}	ΔQ_{max}^2	$(Q_{max} - \bar{Q}_{max})^2$	Оправды- ваемость
1966	206	233	169	37	1381	9467	0
1968	86.4	124	109	-22	502	497	1
1969	104	112	101	3	7	22	1
1971	126	212	158	-32	1029	299	1
1976	92.5	113	102	-9	90	263	1
1979	87.3	134	115	-28	758	458	1
1980	132	103	96	36	1325	543	0
1982	135	141	119	16	257	692	1
1983	177	113	102	75	5628	4664	0
1984	136	119	106	30	917	745	0

Продолжение таблицы 5.1

Год	$Y_{\text{факт}}$	Q_{max}	Q_{max} рас- четное	ΔQ_{max}	ΔQ_{max}^2	$(Q_{\text{max}} - \bar{Q}_{\text{max}})^2$	Оправды- ваемость
1985	114	117	104	10	91	28	1
1987	102	149	124	-22	469	45	1
1993	54.3	98.9	93	-39	1493	2960	1
1994	94.3	100	94	1	0	207	1
1995	132	216	160	-28	793	543	1
1996	71	88.5	86	-15	225	1422	1
1998	141	123	108	33	1077	1043	0
2000	83.9	92.0	88	-4	20	615	1
2001	104	93.0	89	15	224	22	1
2002	65.6	91.1	88	-22	491	1858	1
2003	70.8	57.8	64	7	47	1437	1
2004	97.4	130	112	-15	226	128	1
2005	150	125	109	41	1648	1705	0
2006	61.8	78.3	79	-17	295	2200	1
2007	67.1	54.0	61	6	38	1731	1
2008	102	122	108	-6	31	45	1
2009	77.3	74.3	76	1	1	986	1
2010	173	178	140	33	1092	4134	0
Среднее		108					
Сумма					20154	38758	21

Таблица 5.2 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Q_{max}=f(Y_{пр})$ на зависимом материале с использованием спрогнозированных слоев стока половодья

Год	$Y_{пр}$	Q_{max}	Q_{max} рас- четное	ΔQ_{max}	ΔQ_{max}^2	$(Q_{max} - \bar{Q}_{max})^2$	Оправды- ваемость
1966	206	215.9	160	56	3114	9467	0
1968	86.4	139.8	118	22	463	497	1
1969	104	141.6	119	22	496	22	1
1971	126	170.7	136	35	1207	299	0
1976	92.5	142.0	120	22	503	263	1
1979	87.3	142.1	120	22	506	458	1
1980	132	109.9	100	10	98	543	1
1982	135	134.2	115	19	371	692	1
1983	177	102.8	95	7	54	4664	1
1984	136	130.0	112	18	309	745	1
1985	114	120.1	106	14	188	28	1
1987	102	126.0	110	16	255	45	1
1993	54.3	74.3	76	-2	3	2960	1
1994	94.3	105.3	97	8	68	207	1
1995	132	168.7	135	34	1147	543	0
1996	71	110.7	101	10	103	1422	1
1998	141	129.1	112	17	296	1043	1
2000	83.9	104.8	97	8	65	615	1
2001	104	93.3	89	4	17	22	1
2002	65.6	148.2	123	25	625	1858	1
2003	70.8	120.5	107	14	192	1437	1
2004	97.4	116.3	104	12	150	128	1
2005	150	88.4	86	2	6	1705	1
2006	61.8	95.9	91	5	24	2200	1

Продолжение таблицы 5.2

Год	$Y_{\text{пр}}$	Q_{max}	Q_{max} рас- четное	ΔQ_{max}	ΔQ_{max}^2	$(Q_{\text{max}} - \bar{Q}_{\text{max}})^2$	Оправды- ваемость
2007	67.1	71.1	74	-3	7	1731	1
2008	102	66.8	71	-4	15	45	1
2009	77.3	76.6	78	-1	1	986	1
2010	173	146.7	122	24	594	4134	1

Таблица 5.3 — Оценка методики прогноза максимальных расходов весеннего половодья за зависимом материале

Вид зависимости	S/σ	P, %	Эффективность методики
$Q_{\text{max}}=4.36(Y)^{0.6651}$ (при фактиче- ских данных)	0.72	66	Эффективна
$Q_{\text{max}}=4.36(Y)^{0.6651}$ (при спрогнози- рованных данных)	0.53	78	Эффективна

В таблице 5.5 и 5.4 представлены результаты поверочных прогнозов максимального расхода весеннего половодья на независимом материале.

В таблице 5.6 приведена сводная информация о проверке методики на независимом материале. Не достаточную эффективность методики можно объяснить тем, что в последние годы (2021 – 2022 гг.) характер половодья был многопиковый, когда на половодье накладывались пики дождевых паводков.

Таблица 5.4 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Q_{max}=f(Y_{факт})$ на независимом материале с фактическими слоями стока

Год	$Y_{пр}$	Q_{max}	Q_{max} рас- четное	ΔQ_{max}	ΔQ_{max}^2	$(Q_{max} - \bar{Q}_{max})^2$	Оправды- ваемость
2011	136	170	136	0	0	1654	1
2012	95.4	95.9	91	4	20	0	1
2013	161	115	103	58	3337	4313	0
2014	31.1	58.7	65	-34	1123	4125	1
2015	65.6	85.9	84	-19	348	884	1
2016	76.8	81.5	81	-4	19	343	1
2017	71.2	28.8	39	32	1015	582	0
2018	135	42.1	51	84	7013	1574	0
2019	107	35.8	46	61	3747	136	0
2020	74.2	137.6	117	-43	1830	446	1

Таблица 5.5 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Q_{max}=f(Y_{факт})$ на независимом материале с прогнозными слоями стока

Год	$Y_{пр}$	Q_{max}	Q_{max} рас- четное	ΔQ_{max}	ΔQ_{max}^2	$(Q_{max} - \bar{Q}_{max})^2$	Оправды- ваемость
2011	136	170	136	0	0	1654	1
2012	95.4	96	91	5	22	0	1
2013	161	115	102	59	3437	4313	0
2014	31.1	59	65	-34	1180	4125	1
2015	65.6	86	84	-19	350	884	1
2016	76.8	82	81	-5	21	343	1
2017	71.2	29	41	30	926	582	0
2018	135	42	52	83	6811	1574	0
2019	107	36	47	60	3587	136	0
2020	74.2	138	115	-41	1693	446	1

Таблица 5.6 — Прогностические зависимости для максимального расхода воды весеннего половодья

Вид зависимости	S/σ	P, %	Эффективность методики
$Q_{max}=3.79(Y)^{0.6967}$ (при фактических данных)	1.20	60	Не эффективна
$Q_{max}=3.79(Y)^{0.6967}$ (при спрогнозированных данных)	1.18	60	Не эффективна

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью выпускной работы являлась разработка методик прогнозирования элементов весеннего половодья на р. Тосна в г. Тосно с большой заблаговременностью. В работе были реализованы два метода прогнозирования.

На первом этапе была разработана методика прогноза основных характеристик весеннего половодья на р. Тосна в районе города Тосна. Для слоя стока получены уравнения регрессии и зависимость максимально возможных потерь талого стока от косвенных показателей увлажнения бассейна для прогноза физико-статистическим воднобалансовым методом.

На втором этапе были построены регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать сток весеннего половодья, а также максимального расхода.

В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты:

- 1) собраны исходные гидрометеорологические данные по бассейну р. Тосна за период с 1966 по 2020 год;
- 2) установлены основные факторы, определяющие сток весеннего половодья;
- 3) получены региональные формулы для определения потерь талого стока;
- 4) установлены факторы, обуславливающие величину максимальных расходов реки Тосна;
- 5) составлены поверочные прогнозы стока за период весеннего половодья, максимальные расходов и уровней

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Полученная методика прогноза, основанная на физико-статистической закономерности, использующая ному осадков, оказалась эффективной. Но точность прогнозов по ней оказалась недостаточной.

Поэтому дальнейшие усилия были направлены на разработку методик, основанных на статистических методах. В целом разработанные методики оказались эффективными и в соответствии с нормами, предъявляемыми к службе прогнозов, полученная методика является приемлемой для практического использования.

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: 10.06.2023).
2. Физико-географическое районирование Ленинградской области. — Текст: электронный // ТОПоГИС: [сайт]. — URL: <https://topogis.ru/fiziko-geograficheskoye-rayonirovaniye-leningradskoy-oblasti.php> (дата обращения: 10.06.2023).
3. Ленинградская область. — Текст: электронный // Клуб туристов Московской застава: [сайт]. — URL: <http://daikicat.narod.ru/library/region/len47/index.html> (дата обращения: 10.06.2023).
4. Георгиевский Ю. М. гидрологические прогнозы / Ю. М. Георгиевский, С. В. Шаночкин. — СПб: РГГМУ, 2007. — 436 с. — Текст: непосредственный.
5. 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.
6. 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: 04.04.2023).
7. Суточные данные. — Текст: электронный // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: [сайт]. — URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения: 04.04.2023).

8. Руководство по гидрологическим прогнозам. — Выпуск 1. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. — 358 с. — Текст: непосредственный.
9. Попов, Е. Г. Гидрологические прогнозы / Е. Г. Попов. — 2-е изд. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. — 256 с. — Текст: непосредственный.
10. Георгиевский, Ю. М. Гидрологические прогнозы / Ю. М. Георгиевский, С. В. Шаночкин. — Санкт-Петербург: РГГМУ, 2007. — 436 с. — Текст: непосредственный.
11. Бефани, Н. Ф. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам / Н. Ф. Бефани, Г. П. Калинин. — 2-е изд. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. — 390 с. — Текст: непосредственный.
12. Аполлов, Б. А. Гидрологические прогнозы / Б. А. Аполлов, Г. П. Калинин, В. Д. Комаров. — Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1960. — 408 с. — Текст: непосредственный.
13. Тосненский вестник. Электронный ресурс. Режим доступа — <https://tosno-vestnik.ru/2023/03/28/%D0%BF%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B5-%D0%B4%D0%BE%D0%B6%D0%B4%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D1%8B%D1%85-%D0%B2%D1%8B%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D1%85-%D1%82%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%B0-%D1%80%D0%B5%D1%87%D0%BA%D0%B0/> (дата обращения 02.04.2023).
14. 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).
15. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты поверочных прогнозов слоя стока половодья физико-статистическим методом

Год	Исходные данные				$S+X$	P_0	$\lg P_0$	P_0'	$S+X_{cp}$	Прогноз I												
	Y, мм	S, мм	X, мм	I _w , мм						$e^{\frac{S+X}{P_0'}}$	$e^{\frac{S+X}{P_0'}}$	$th \frac{S+X}{P_0'}$	Y_I	δ_I	δ_I^2	$e^{\frac{S+X_{cp}}{P_0'}}$	$e^{\frac{S+X_{cp}}{P_0'}}$	$th \frac{S+X_{cp}}{P_0'}$	Y_{II}	δ_{II}	δ_{II}^2	$(Y_{\phi}-Y_{cp})^2$
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	161	5.66	344	110	2.0	56.7	262	432.8	0.00	1.00	287	-54.3	2952	102.4	0.01	1.00	206	27.3	746.7	13263
1968	124	98	86.45	3.53	184	60	1.8	57.4	177	24.9	0.04	1.00	127	-3.2	10	22.0	0.05	1.00	120	3.8	14.7	38
1976	113	151	63.55	1	215	110	2.0	58.3	230	39.7	0.03	1.00	156	-43.3	1877	52.0	0.02	1.00	172	-59.1	3490.2	23
1979	134	141	58.3	2.22	199	65	1.8	57.9	220	31.3	0.03	1.00	142	-7.5	57	45.0	0.02	1.00	163	-28.5	813.6	261
1980	103	100	48.5	1.8	149	50	1.7	58.0	179	12.9	0.08	0.99	91	11.8	140	22.0	0.05	1.00	122	-18.6	344.4	220
1982	141	157	59.2	1.68	216	74	1.9	58.1	236	41.4	0.02	1.00	158	-17.2	296	58.6	0.02	1.00	178	-37.3	1392.0	537
1983	113	68	84.7	0.77	153	38	1.6	58.4	147	13.7	0.07	0.99	95	18.1	326	12.5	0.08	0.99	90	23.3	542.9	23
1984	119	163	30	3.13	193	72	1.9	57.5	242	28.6	0.03	1.00	136	-16.6	275	67.4	0.01	1.00	185	-65.8	4331.0	1
1985	117	98	52.8	5.55	151	30	1.5	56.7	177	14.3	0.07	0.99	95	22.4	500	22.8	0.04	1.00	121	-3.8	15	1
1987	149	115	69	4.12	184	40	1.6	57.2	194	24.9	0.04	1.00	127	22.0	485	29.9	0.03	1.00	137	11.7	138	971
1993	98.9	58	66.65	0.83	125	25	1.4	58.4	137	8.5	0.12	0.97	68	31.0	961	10.5	0.10	0.98	80	18.9	356	359
1994	100	91	73.3	3.83	164	65	1.8	57.3	170	17.6	0.06	0.99	107	-7.4	54	19.5	0.05	0.99	113	-13.3	178	318
1995	216	89	180.8	0.16	270	50	1.7	58.6	168	99.9	0.01	1.00	211	4.8	23	17.7	0.06	0.99	110	105.9	11213	9636
1996	88.5	68	88.55	0.18	157	70	1.8	58.6	147	14.5	0.07	0.99	99	-10.0	100	12.4	0.08	0.99	90	-1.0	1	861
1998	123	85	123.35	1.87	208	86	1.9	58.0	164	36.3	0.03	1.00	150	-27.4	753	17.0	0.06	0.99	107	16.3	264	27
2000	92.0	43	96.65	2.56	140	50	1.7	57.7	122	11.2	0.09	0.98	83	9.2	84	8.3	0.12	0.97	66	25.8	664	667
2001	93.0	55	69.8	0.39	125	40	1.6	58.5	134	8.4	0.12	0.97	68	25.1	630	9.9	0.10	0.98	77	16.0	256	617
2002	91.1	71	156.15	0.086	227	155	2.2	58.6	150	48.2	0.02	1.00	169	-77.5	6003	13.0	0.08	0.99	92	-1.3	2	715
2003	57.8	72	91.9	4.24	164	117	2.1	57.2	151	17.6	0.06	0.99	107	-49.3	2431	14.1	0.07	0.99	95	-36.9	1365	3604
2004	130	76	57.5	5.5	134	10	1.0	56.7	155	10.5	0.10	0.98	78	52.2	2726	15.5	0.06	0.99	99	30.9	956	148
2005	125	71	60.9	0.053	132	20	1.3	58.6	150	9.5	0.11	0.98	75	50.4	2545	13.0	0.08	0.99	92	32.6	1063	51
2006	78.3	78	68.5	0.32	147	75	1.9	58.5	157	12.2	0.08	0.99	89	-10.4	109	14.7	0.07	0.99	99	-21.0	442	1563
2007	54.0	43	49.6	0.22	93	40	1.6	58.6	122	4.9	0.21	0.92	39	15.2	232	8.1	0.12	0.97	66	-11.5	133	4075
2009	74.3	68	28.8	5.09	97	20	1.3	56.9	147	5.5	0.18	0.94	44	30.7	943	13.3	0.07	0.99	91	-16.8	282	1895
2010	178	171	57.4	1.16	228	44	1.6	58.2	250	50.5	0.02	1.00	170	7.8	61	73.6	0.01	1.00	192	-14.1	199	3620
Ср.	117.8		79.3											Σ	24573					Σ	29203	43495

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты поверочных прогнозов слоя стока половодья

Таблица Б.1 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости

$$Y = f(S, Q_X, X)$$

Год	S	Q_X	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
1966	80	5.66	161	216	233	17	292	12513	1
1968	57	3.53	86.45	140	124	16	249	8.2	1
1969	67	0.65	90.95	142	112	30	878	83.5	0
1971	70	0.62	139.55	171	212	41	1710	8256	0
1976	78	1.00	63.55	142	113	29	840	66.2	1
1979	76	2.22	58.3	142	134	8	66	165	1
1980	55	1.80	48.5	110	103	7	48	329	1
1982	71	1.68	59.2	134	141	7	46	394	1
1983	37	0.77	84.7	103	113	10	104	66.2	1
1984	75	3.13	30	130	119	11	122	4.58	1
1985	48	5.55	52.8	120	117	3	10	17.13	1
1987	51	4.12	69	126	149	23	530	776	1
1993	21	0.83	66.65	74	98.9	25	604	495	1
1994	33	3.83	73.3	105	100	5	28	447	1
1995	52	0.16	180.8	169	216	47	2240	8999	0
1996	44	0.18	88.55	111	88.5	22	491	1065	1
1998	38	1.87	123.35	129	123	6	37	3.5	1
2000	27	2.56	96.65	105	92.0	13	165	849	1
2001	37	0.39	69.8	93	93.0	0	0	792	1
2002	46	0.086	156.15	148	91.1	57	3259	902	0
2003	36	4.24	91.9	120	57.8	63	3931	4012	0
2004	43	5.5	57.5	116	130	14	187	79	1
2005	38	0.053	60.9	88	125	37	1342	14.9	0
2006	40	0.32	68.5	96	78.3	18	311	1835	1
2007	28	0.22	49.6	71	54.0	17	293	4508	1
2008	20	3.06	36.05	67	122	55	3051	0.74	0
2009	24	5.09	28.8	77	74.3	2	5	2194	1
2010	84	1.16	57.4	147	178	31	981	3233	0
Среднее					121				
Сумма							21821	52108	20

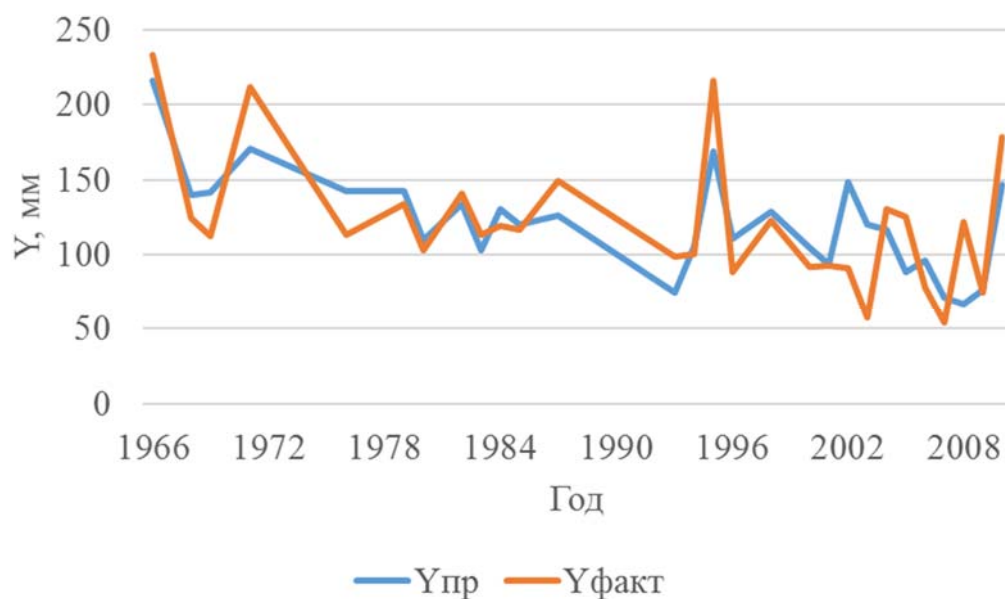


Рисунок Б.1 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости

$$Y = f(S, Q_X, X)$$

Таблица Б.2 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(S, Q_X)$

Год	S	Q_X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
1966	80	5.66	171	233	62	3795	12513	0
1968	57	3.53	135	124	11	121	8.2	1
1969	67	0.65	143	112	31	930	83.5	0
1971	70	0.62	147	212	65	4280	8256	0
1976	78	1.00	158	113	45	2066	66.2	0
1979	76	2.22	158	134	24	593	165	1
1980	55	1.80	128	103	25	648	329	1
1982	71	1.68	150	141	9	86	394	1
1983	37	0.77	101	113	12	136	66.2	1
1984	75	3.13	159	119	40	1597	4.58	0
1985	48	5.55	127	117	10	100	17.13	1
1987	51	4.12	128	149	21	441	776	1
1993	21	0.83	79	99	19	380	495	1
1994	33	3.83	103	100	3	6	447	1
1995	52	0.16	121	216	95	9077	8999	0
1996	44	0.18	110	89	21	451	1065	1
1998	38	1.87	105	123	18	319	3.5	1
2000	27	2.56	91	92	1	0	849	1
2001	37	0.39	101	93	8	57	792	1
2002	46	0.086	112	91	21	449	902	1
2003	36	4.24	108	58	50	2476	4012	0
2004	43	5.50	120	130	10	100	79	1

Продолжение таблицы Б.2

Год	S	Q_X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2005	38	0.053	101	125	24	568	14.9	1
2006	40	0.32	105	78	26	687	1835	1
2007	28	0.22	88	54	34	1138	4508	0
2008	20	3.06	83	122	39	1529	0.74	0
2009	24	5.09	93	74	19	344	2194	1
2010	84	1.16	167	178	11	119	3233	1
Среднее				121				
Сумма						32493	52108	19

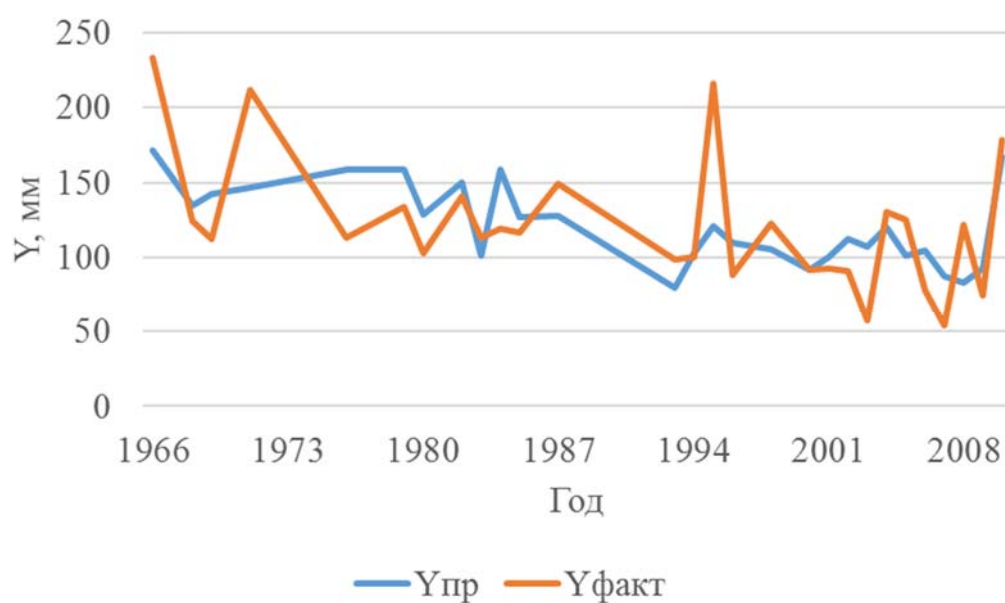


Рисунок Б.2 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(S, Q_X)$

Таблица Б.3 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(S, X)$

Год	S	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
1966	80	161	198	233	35	1259	12513	0
1968	57	86.45	134	124	10	93	8.2	1
1969	67	90.95	148	112	36	1291	83.5	0
1971	70	139.55	175	212	37	1367	8256	0
1976	78	63.55	148	113	35	1230	66.2	0
1979	76	58.3	143	134	9	83	165	1
1980	55	48.5	113	103	10	98	329	1

Продолжение таблицы Б.3

Год	S	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправ- дывае- мость
1982	71	59.2	137	141	4	12	394	1
1983	37	84.7	108	113	5	20	66.2	1
1984	75	30	128	119	9	85	4.58	1
1985	48	52.8	106	117	11	111	17.13	1
1987	51	69	118	149	31	966	776	0
1993	21	66.65	80	99	19	344	495	1
1994	33	73.3	98	100	2	3	447	1
1995	52	180.8	173	216	43	1843	8999	0
1996	44	88.55	119	89	30	921	1065	0
1998	38	123.35	128	123	5	29	3.5	1
2000	27	96.65	102	92	10	102	849	1
2001	37	69.8	101	93	8	69	792	1
2002	46	156.15	154	91	63	3943	902	0
2003	36	91.9	111	58	53	2804	4012	0
2004	43	57.5	103	130	27	748	79	1
2005	38	60.9	98	125	27	717	14.9	1
2006	40	68.5	104	78	26	677	1835	1
2007	28	49.6	81	54	27	709	4508	1
2008	20	36.05	64	122	58	3320	0.74	0
2009	24	28.8	66	74	9	73	2194	1
2010	84	57.4	152	178	26	656	3233	1
Среднее				121				
Сумма						23575	52108	18

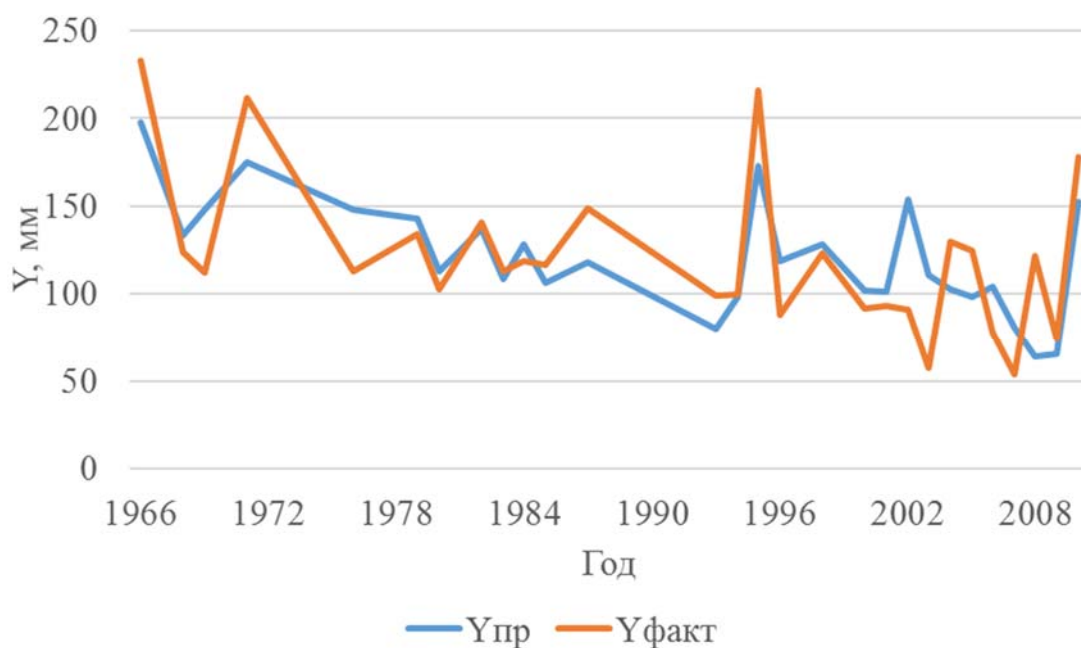


Рисунок Б.3 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(S, X)$

Таблица Б.4 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(Q_x, X)$

Год	Q_x	X	$Y_{пр}$	$Y_{факт}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{факт} - \bar{Y}_{факт})^2$	Оправды- ваемость
1966	5.66	161	188	233	45	1999	12513	0
1968	3.53	86.45	131	124	7	55	8.2	1
1969	0.65	90.95	121	112	9	76	83.5	1
1971	0.62	139.55	151	212	61	3704	8256	0
1976	1.00	63.55	105	113	8	61	66.2	1
1979	2.22	58.3	108	134	26	697	165	1
1980	1.80	48.5	99	103	4	12	329	1
1982	1.68	59.2	106	141	35	1251	394	0
1983	0.77	84.7	117	113	4	19	66.2	1
1984	3.13	30	94	119	25	621	4.58	1
1985	5.55	52.8	120	117	3	8	17.13	1
1987	4.12	69	123	149	26	663	776	1
1993	0.83	66.65	106	98.9	7	55	495	1
1994	3.83	73.3	125	100	25	604	447	1
1995	0.16	180.8	175	216	41	1689	8999	0
1996	0.18	88.55	117	88.5	29	814	1065	1
1998	1.87	123.35	147	123	24	568	3.5	1
2000	2.56	96.65	133	92.0	41	1705	849	0
2001	0.39	69.8	106	93.0	13	175	792	1
2002	0.086	156.15	159	91.1	68	4619	902	0
2003	4.24	91.9	138	57.8	80	6464	4012	0

Продолжение таблицы Б.4

Год	Q_X	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2004	5.5	57.5	123	130	7	56	79	1
2005	0.053	60.9	99	125	26	673	14.9	1
2006	0.32	68.5	105	78.3	27	717	1835	1
2007	0.22	49.6	93	54.0	39	1500	4508	0
2008	3.06	36.05	98	122	24	597	0.74	1
2009	5.09	28.8	103	74.3	28	797	2194	1
2010	1.16	57.4	102	178	76	5768	3233	0
Среднее				121				
Сумма						35971	52108	19

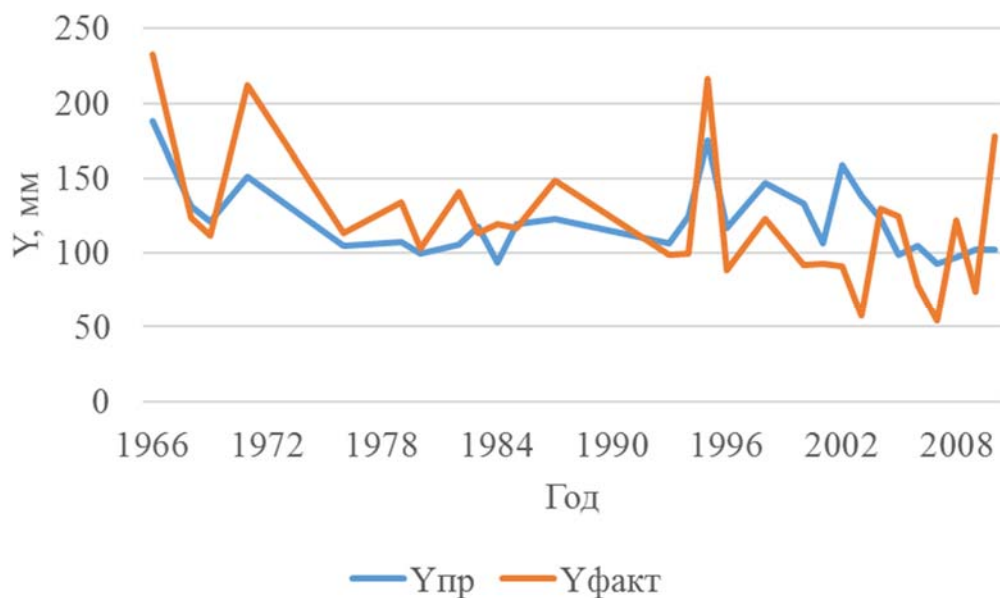


Рисунок Б.4 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(Q_X, X)$

Таблица Б.5 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(Q_X)$

Год	Q_X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
1966	5.66	128	233	105	10930	12513	0
1968	3.53	124	124	0.0	0.0	8.2	1
1969	0.65	118	112	6	36	83.5	1
1971	0.62	118	212	94	8847	8256	0
1976	1	119	113	6	33	66.2	1
1979	2.22	121	134	13	162	165	1
1980	1.8	120	103	17	303	329	1
1982	1.68	120	141	21	435	394	1

Продолжение таблицы Б.5

Год	Q_X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
1983	0.77	118	113	5	28	66.2	1
1984	3.13	123	119	4	17	4.58	1
1985	5.55	128	117	11	126	17.13	1
1987	4.12	125	149	24	564	776	1
1993	0.83	118	98.9	19	379	495	1
1994	3.83	125	100	25	607	447	1
1995	0.16	117	216	99	9804	8999	0
1996	0.18	117	88.5	29	814	1065	1
1998	1.87	121	123	2	6	3.5	1
2000	2.56	122	92.0	30	899	849	0
2001	0.39	117	93.0	24	598	792	1
2002	0.086	117	91.1	26	662	902	1
2003	4.24	125	57.8	68	4582	4012	0
2004	5.5	128	130	2	4	79	1
2005	0.053	117	125	8	68	14.9	1
2006	0.32	117	78.3	39	1522	1835	0
2007	0.22	117	54.0	63	3983	4508	0
2008	3.06	123	122	1.0	1.1	0.74	1
2009	5.09	127	74.3	53	2805	2194	0
2010	1.16	119	178	59	3473	3233	0
Среднее		121					
Сумма					51689	52108	19

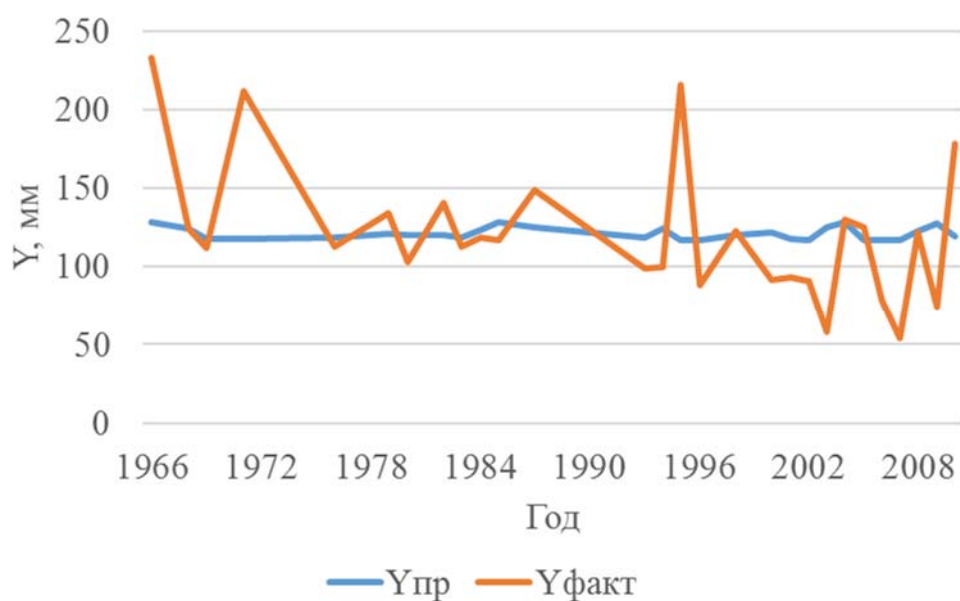


Рисунок Б.5 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(Q_X)$

Таблица Б.6 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y=f(X)$

Год	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
1966	161	168	233	65	4204	12513	0
1968	86.45	125	124	1	0	8.2	1
1969	90.95	127	112	15	235	83.5	1
1971	139.55	156	212	56	3175	8256	0
1976	63.55	111	113	2	3	66.2	1
1979	58.3	108	134	26	661	165	1
1980	48.5	103	103	0	0	329	1
1982	59.2	109	141	32	1037	394	0
1983	84.7	124	113	11	114	66.2	1
1984	30	92	119	27	741	4.58	1
1985	52.8	105	117	12	142	17.13	1
1987	69	115	149	34	1189	776	0
1993	66.65	113	98.9	14	203	495	1
1994	73.3	117	100	17	290	447	1
1995	180.8	180	216	36	1317	8999	0
1996	88.55	126	88.5	37	1400	1065	0
1998	123.35	146	123	23	539	3.5	1
2000	96.65	131	92.0	39	1493	849	0
2001	69.8	115	93.0	22	483	792	1
2002	156.15	165	91.1	74	5511	902	0
2003	91.9	128	57.8	70	4910	4012	0
2004	57.5	108	130	22	492	79	1
2005	60.9	110	125	15	231	14.9	1
2006	68.5	114	78.3	36	1291	1835	0
2007	49.6	103	54.0	49	2421	4508	0
2008	36.05	95	122	27	713	0.74	1
2009	28.8	91	74.3	17	282	2194	1
2010	57.4	108	178	70	4934	3233	0
Среднее			121				
Сумма					38011	52108	16

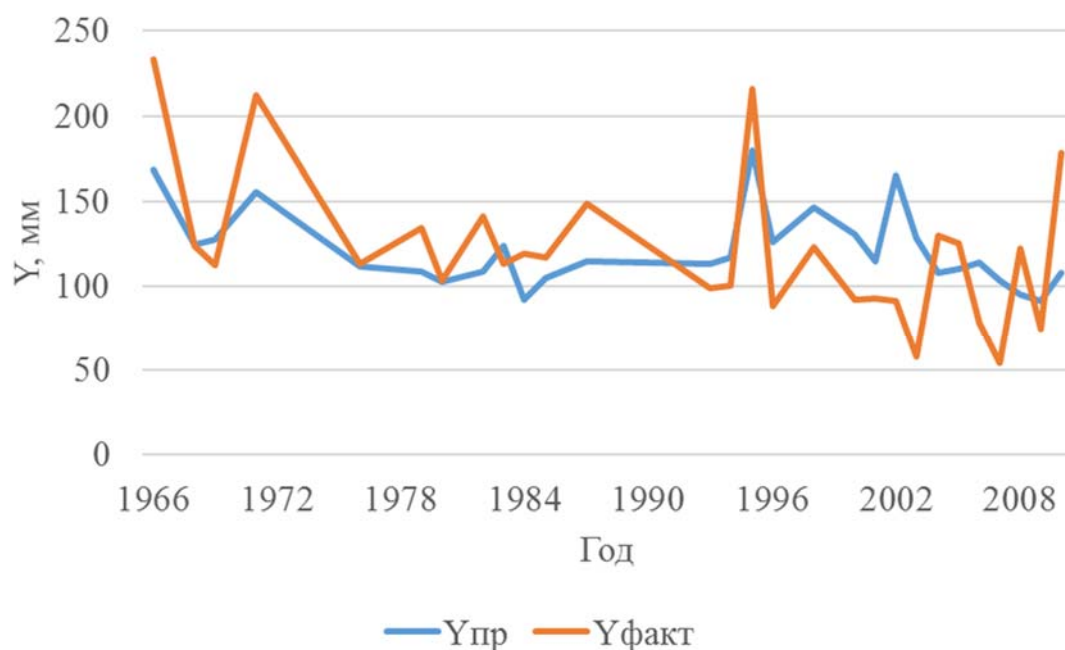


Рисунок Б.6 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(X)$

Таблица Б.7 — Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(S)$

Год	S	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
1966	80	164	233	69.3	4805	12513	0
1968	57	132	124	7.97	63.56	8.2	1
1969	67	146	112	34	1140	83.5	0
1971	70	150	212	62	3857	8256	0
1976	78	161	113	48	2297	66.2	0
1979	76	158	134	24	584	165	1
1980	55	129	103	26	687	329	1
1982	71	151	141	10	106	394	1
1983	37	104	113	9	74	66.2	1
1984	75	157	119	38	1428	4.58	0
1985	48	120	117	3	7	17.13	1
1987	51	124	149	25	640	776	1
1993	21	82	98.9	17	274	495	1
1994	33	99	100	1	1	447	1
1995	52	125	216	91	8267	8999	0
1996	44	114	88.5	26	653	1065	1
1998	38	106	123	17	297	3.5	1
2000	27	91	92.0	1	2	849	1
2001	37	104	93.0	11	130	792	1
2002	46	117	91.1	26	661	902	1
2003	36	103	57.8	45	2045	4012	0

Продолжение таблицы Б.7

Год	S	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2004	43	113	130	17	300	79	1
2005	38	106	125	19	370	14.9	1
2006	40	109	78.3	30	914	1835	0
2007	28	92	54.0	38	1443	4508	0
2008	20	81	122	41	1684	0.74	0
2009	24	86	74.3	12	148	2194	1
2010	84	169	178	9	77	3233	1
Среднее			121				
Сумма					32954	52108	18

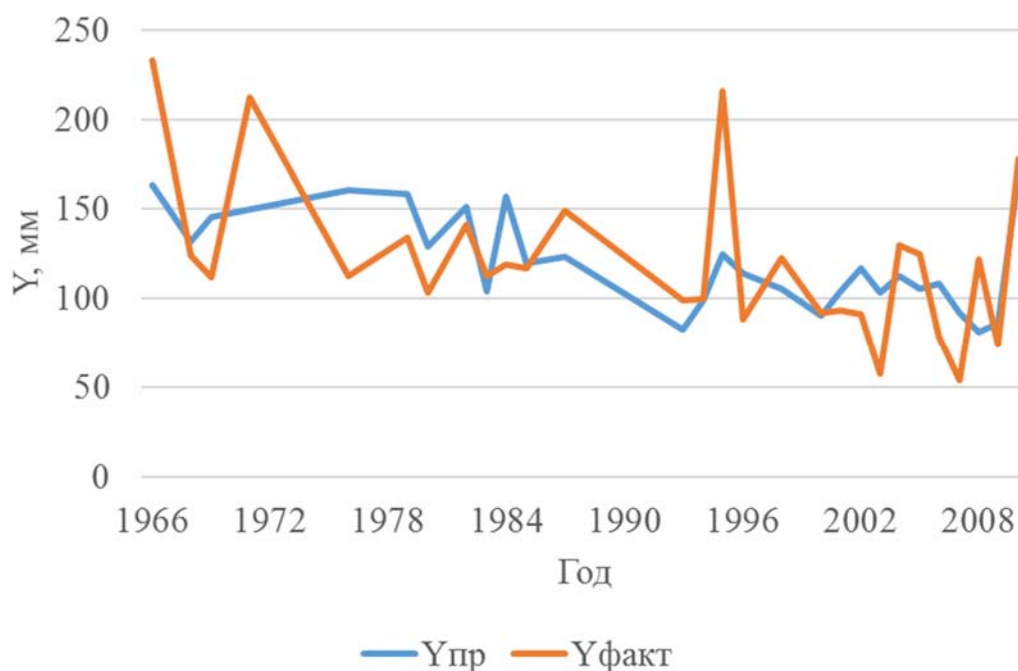


Рисунок Б.7 – Результаты поверочных прогнозов по зависимости $Y = f(S)$

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты прогнозов слоя стока половодья

Таблица В.1 — Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(S, Q_X, X)$

Год	S	Q_X	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2010	84	1.16	57.4	147	178	31	981	7128	0
2011	71	2.81	44.2	131	170	39	1498	5841	0
2012	36	2.84	64.4	100	96	4	16	5	1
2013	46	0.83	75.85	109	115	6	33	459	1
2014	14	1.2	33.95	50	59	8	70	1216	1
2015	45	1.3	105	125	86	39	1560	59	0
2016	24	4.01	138.75	130	82	48	2321	146	0
2017	20	6.39	116.3	123	29	95	8957	4196	0
2018	28	4.77	66.9	100	42	58	3358	2649	0
2019	54	0.73	101.8	132	36	96	9264	3338	0
2020	12	0.65	79.05	69	138	68	4674	1938	0
Среднее					93.5				
Сумма							32733	26975	3

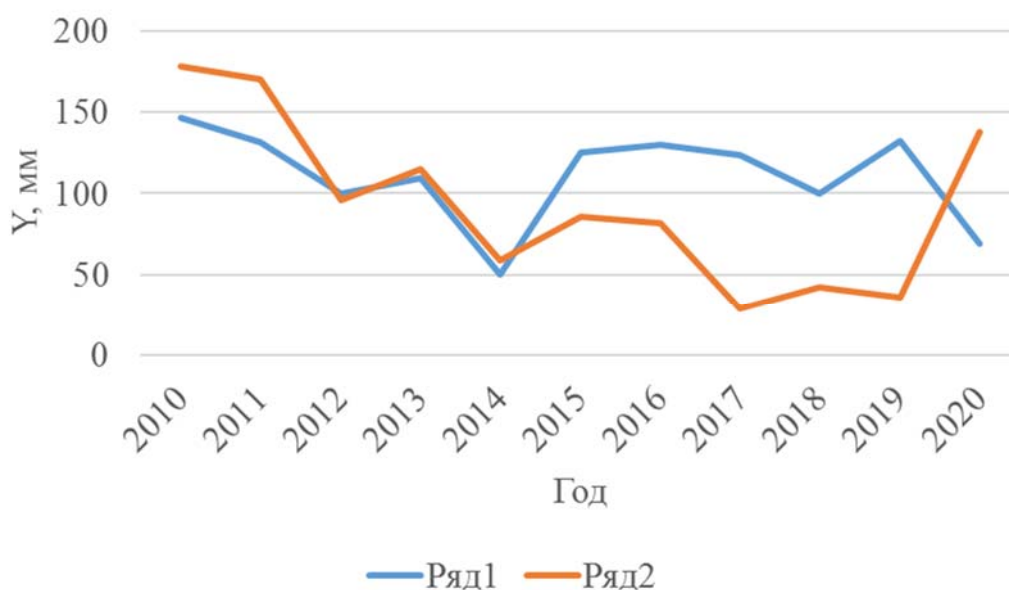


Рисунок В.1 – Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(S, Q_X, X)$

Таблица В.2 — Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(S, Q_X)$

Год	S	Q_X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2010	84	1.16	167	178	11	119	7128	1
2011	71	2.81	153	170	17	298	5841	1

Продолжение таблицы В.2

Год	S	Q_X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2012	36	2.84	105	96	8.6	74	5	1
2013	46	0.83	114	115	1.1	1	459	1
2014	14	1.2	71	59	12	140	1216	1
2015	45	1.3	114	86	28	765	59	1
2016	24	4.01	90	82	9.0	80.9	146	1
2017	20	6.39	90	29	61	3767	4196	0
2018	28	4.77	98	42	56	3089	2649	0
2019	54	0.73	125	36	89	7909	3338	0
2020	12	0.65	67	138	71	5043	1938	0
Среднее				93.5				
Сумма						21286	26975	5

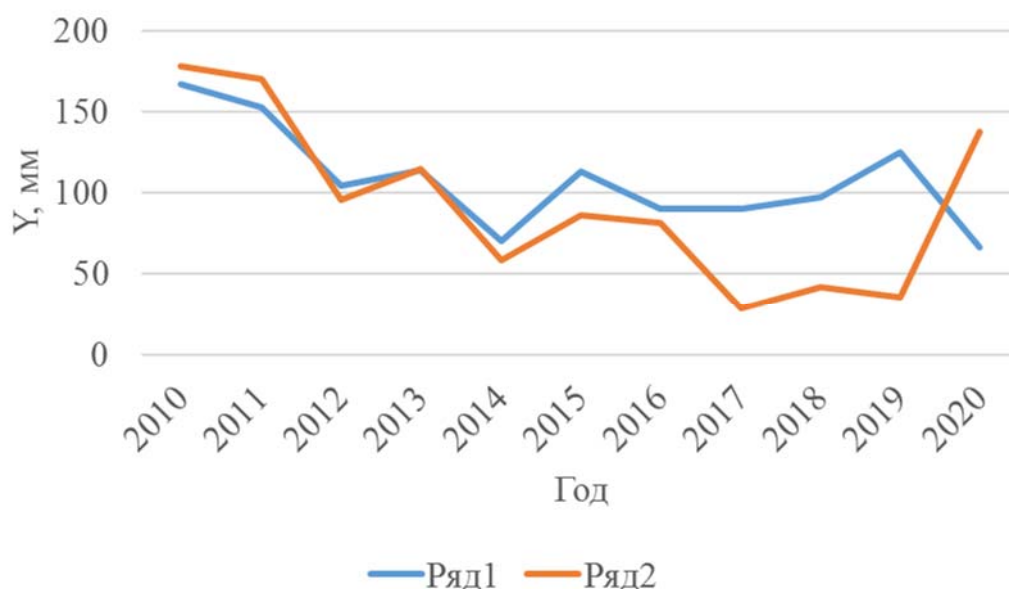


Рисунок В.2 – Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(S, Q_X)$

Таблица В.3 — Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(S, X)$

Год	S	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2010	84	57.4	152	178	26	656	7128	1
2011	71	44.2	130	170	40	1581	5841	0
2012	36	64.4	97	96	1.6	3	5	1
2013	46	75.85	115	115	0.2	0	459	1
2014	14	33.95	56	59	2.6	7	1216	1
2015	45	105	128	86	42	1772	59	0

Продолжение таблицы В.3

Год	S	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2016	24	138.75	119	82	37	1390	146	0
2017	20	116.3	103	29	74	5520	4196	0
2018	28	66.9	89	42	47	2197	2649	0
2019	54	101.8	137	36	102	10319	3338	0
2020	12	79.05	75	138	62	3868	1938	0
Среднее				93,5				
Сумма						27313	26975	4

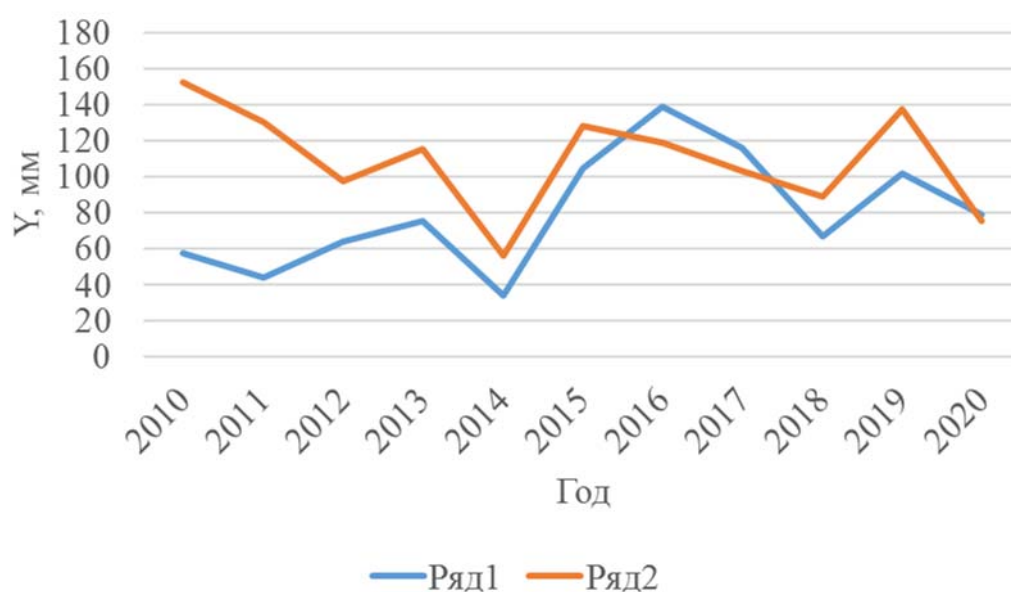


Рисунок В.3 – Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(S, X)$

Таблица В.4 — Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(Q_X, X)$

Год	Q_X	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2010	1.16	57.4	102	178	76	5768	7128	0
2011	2.81	44.2	102	170	69	4691	5841	0
2012	2.84	64.4	114	96	18	340	5	1
2013	0.83	75.85	112	115	2.9	8	459	1
2014	1.2	33.95	88	59	29	830	1216	1
2015	1.3	105	133	86	47	2183	59	0
2016	4.01	138.75	167	82	85	7235	146	0
2017	6.39	116.3	164	29	135	18180	4196	0
2018	4.77	66.9	125	42	83	6869	2649	0

Продолжение таблицы В.4

Год	Q_X	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2019	0.73	101.8	128	36	92	8489	3338	0
2020	0.65	79.05	113	138	24	592	1938	1
Среднее				93.5				
Сумма						55185	26975	3

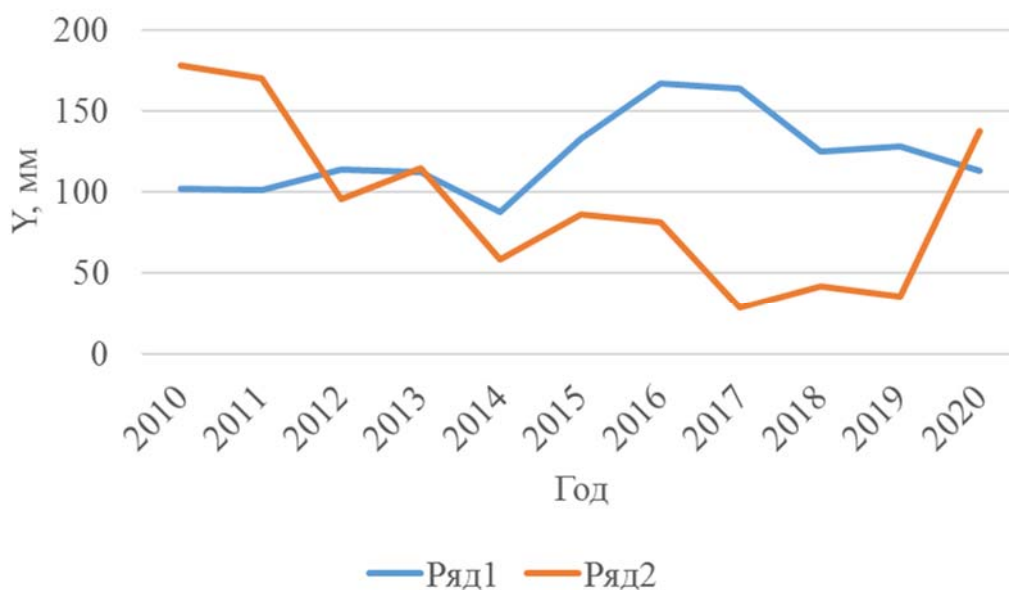


Рисунок В.4 – Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(Q_X, X)$

Таблица В.5 — Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(Q_X)$

Год	Q_X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2010	1.16	119	178	59	3473	7128	0
2011	2.81	123	170	48	2255	5841	0
2012	2.84	123	96	27	711	5	1
2013	0.83	118	115	3.4	11	459	1
2014	1.2	119	59	61	3654	1216	0
2015	1.3	119	86	34	1120	59	0
2016	4.01	125	82	44	1893	146	0
2017	6.39	130	29	101	10237	4196	0
2018	4.77	127	42	85	7140	2649	0
2019	0.73	118	36	82	6785	3338	0
2020	0.65	118	138	20	384	1938	1
Среднее			93.5				
Сумма					37664	26975	2

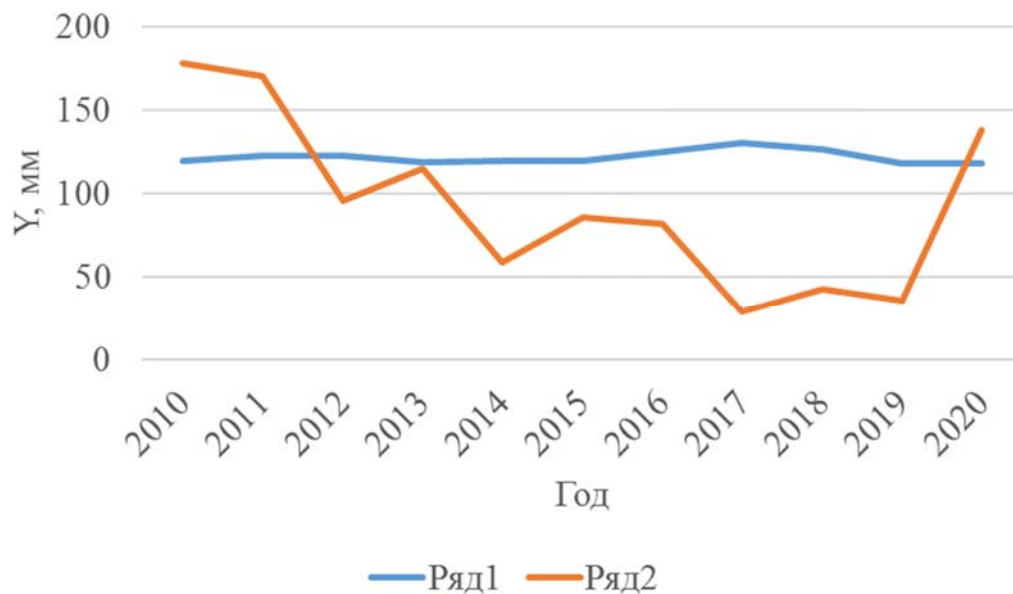


Рисунок В.5 – Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(Q_X)$

Таблица В.6 — Результаты прогнозов по зависимости $Y = f(X)$

Год	X	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2010	57.4	133	178	46	2068	7128	0
2011	44.2	114	170	56	3100	5841	0
2012	64.4	142	96	46	2141	5	0
2013	75.85	158	115	43	1846	459	0
2014	33.95	100	59	42	1722	1216	0
2015	105	198	86	112	12601	59	0
2016	138.75	245	82	163	26630	146	0
2017	116.3	214	29	185	34201	4196	0
2018	66.9	146	42	104	10717	2649	0
2019	101.8	194	36	158	24946	3338	0
2020	79.05	162	138	25	614	1938	1
Среднее			93.5				
Сумма					120585	26975	1

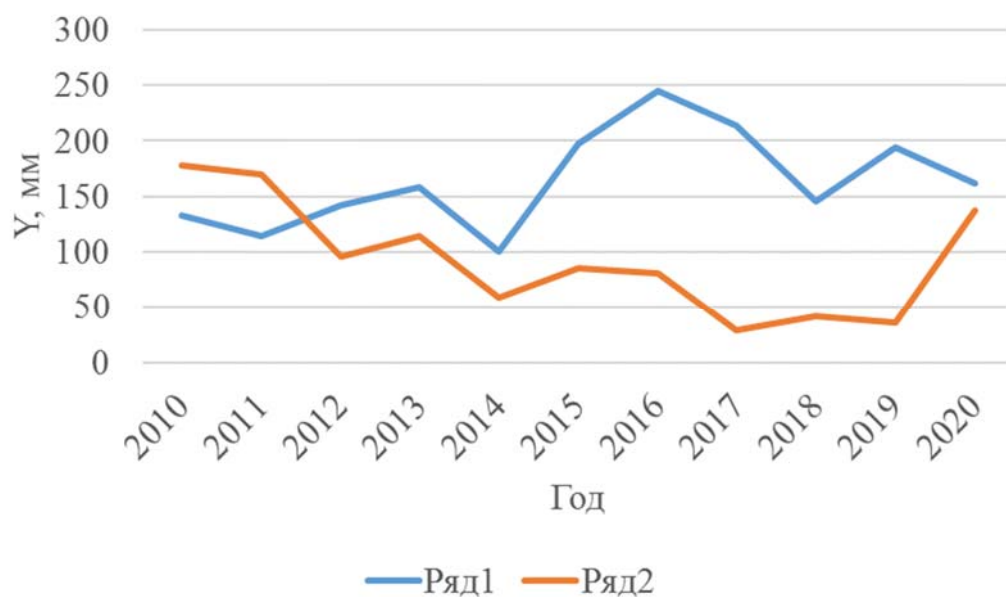


Рисунок В.6 – Результаты прогнозов по зависимости $Y=f(X)$

Таблица В.7 — Результаты прогнозов по зависимости $Y=f(S)$

Год	S	$Y_{\text{пр}}$	$Y_{\text{факт}}$	ΔY	ΔY^2	$(Y_{\text{факт}} - \bar{Y}_{\text{факт}})^2$	Оправды- ваемость
2010	84	123	178	55	2996	7128	0
2011	71	116	170	54	2950	5841	0
2012	36	95	96	0.6	0	5	1
2013	46	101	115	14	193	459	1
2014	14	82	59	24	564	1216	1
2015	45	101	86	15	214	59	1
2016	24	88	82	6.8	46.0	146	1
2017	20	86	29	57	3266	4196	0
2018	28	91	42	49	2354	2649	0
2019	54	106	36	70	4896	3338	0
2020	12	81	138	56	3172	1938	0
Среднее			93.5				
Сумма					20651	26975	5

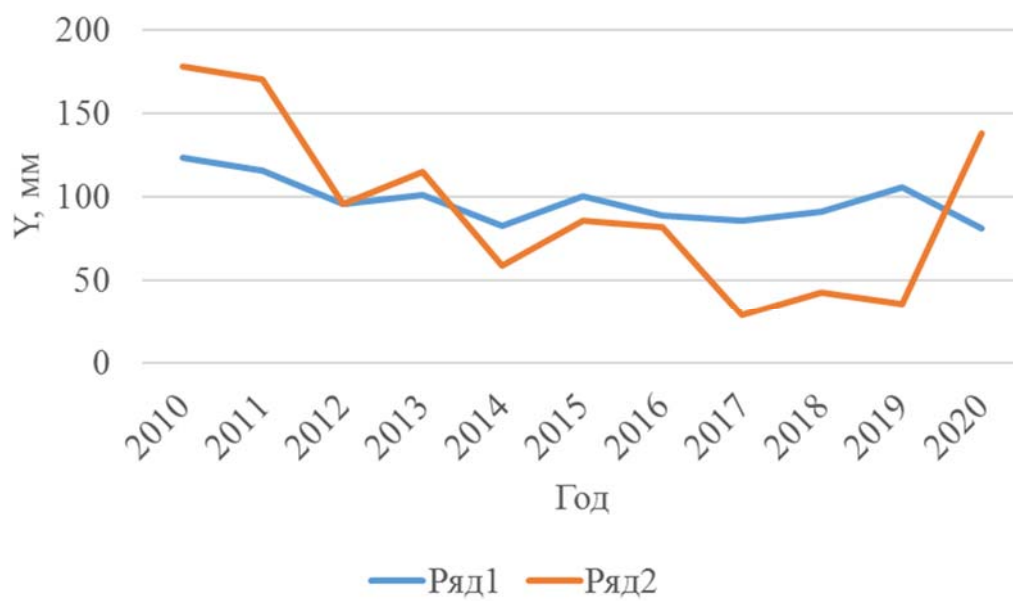


Рисунок В.7 – Результаты прогнозов по зависимости $Y=f(S)$