



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 **Прогноз притока воды в**
Волховское водохранилище

Исполнитель Велейская Алина Игоревна
(фамилия, имя, отчество)

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

Викторова Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«Защита допускаю»
Ведущий кафедрой

(подпись)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Содержание

	Стр.
Введение	3
1 Физико-географическое описание бассейна реки Волхов	6
.....	0
бщая характеристика территории	6
Краткая гидрологическая характеристика р. Волхов и Волховского водохранилища	15
2 Методика долгосрочных прогнозов стока и уровней воды в период межени	21
.....	Оп
ределение притока воды к водохранилищам	21
.....	Ме
тодические основы прогнозирования притока	22
.....	Ме
тодика прогноза сезонного меженного стока	24
Методика прогноза месячного стока по данным о предшествующих расходах воды	25
.....	Пр
огнозы стока по данным о запасе воды в русловой сети и осадкам.....	26
.....	Ме
тодики прогноза уровней воды	28
3 Прогноз притока в Волховское водохранилище	30
.....	Оп
ределение притока воды в водохранилище.....	30
.....	Пр
огноз притока в водохранилище	43
Заключение.....	63
Список использованных источников.....	64
Приложение А. Зависимость уровней нижнего бьефа Волховской ГЭС от уровней Ладожского озера	65
Приложение Б. Многолетние характеристики годового стока р. Волхов в створе Волховской ГЭС.....	66

Приложение В. Данные для построения номограмм	77
Приложение Г. Результаты поверочных прогнозов притока воды к водохранилищу	80

Введение

Гидрологический прогноз – наиболее эффективная и оперативная форма гидрометеорологического обслуживания водного хозяйства. Особенность гидрологического обслуживания на водохранилище в том, что оно носит специализированный характер. Надо знать, как используется предоставляемая информация, какая требуется минимальная заблаговременность и точность прогноза, к каким отрицательным последствиям могут привести те или иные ошибки прогноза и т. д. В то же время очевидно, что гидрологический прогноз для водохранилищ, и в первую очередь прогноз притока воды, в принципиальном отношении не отличается от прогнозов водного режима рек [1].

Максимальный возможный экономический эффект от работы водохранилища мог бы быть получен в том случае, если бы заранее был известен приток воды в водохранилище. Поэтому всегда желательно, чтобы прогноз имел как можно большую заблаговременность и точность. В этом отношении при принятой в настоящее время системе планирования работы большинства водохранилищ оптимальным пределом был бы прогноз гидрографа притока на весь следующий год в середине данного года. Но, во-первых, лишь изредка действительно необходимо столь детальное описание хода притока во времени; большей частью вполне достаточно знать о распределении годового притока по сезонам или кварталам. Во-вторых, и главным образом, пока что нет надежного основания для выпуска прогнозов годового притока (кроме отдельных случаев).

Таким образом, возникает необходимость на основе учета особенностей водохранилища, режима притока, наконец, реальных возможностей для выпуска прогноза ставить вопрос так: а) могут ли гидрологические прогнозы при данной их точности и заблаговременности быть использованы при эксплуатации водохранилища; б) какую минимально

допустимую точность и заблаговременность должны иметь прогнозы; в) как планировать работу водохранилища на основе гидрологического прогноза. Правильное решение указанных вопросов представляет собой сложную проблему. Несомненно, однако, что главное в том экономическом эффекте, которое дает использование прогнозов по сравнению с тем, что имело бы место при отсутствии прогнозов. Последнее ни в какой мере не исключает необходимость дальнейшего совершенствования самих методов прогнозов.

В общем случае метод гидрологических прогнозов представляет собой количественную связь между предсказываемой величиной как функцией и обуславливающими факторами как аргументами (предикторами). И те, и другие суть наблюдаемые за какой-то предшествующий период времени величины. Очевидно, что в целом любой прогноз будет иметь меньшую точность, чем положенные в его основу исходные данные. Погрешность прогноза находится в прямой зависимости от ошибки исходных данных и прежде всего самой предсказываемой величины.

Планирование работы водохранилища обычно ведется по календарным отрезкам времени (год, квартал, месяц). Между тем прогнозы стока рек большей частью принято давать по отдельным фазам гидрологического режима (весеннее половодье, дождевой паводок, летняя межень и пр.), что согласуется с природой явления. Указанное несоответствие может быть преодолено различным образом, но проще всего путем построения вспомогательных эмпирических связей между стоком реки за фазу режима и за соответствующий календарный период времени.

В связи с актуальностью решения задачи прогнозирования притока воды в водохранилище данная работа посвящена рассмотрению методики прогноза для Волховского водохранилища. Волховское водохранилище имеет большое значение, так как служит для забора воды на хозяйственные и производственные нужды, как источник приема и разбавления сточных вод, для выработки электроэнергии, для осуществления судоходства, ведения

рыбного хозяйства и рекреации. Среднеголетняя годовая выработка электроэнергии составляет 370 млн. кВт.ч.

К основным задачам работы можно отнести:

- сбор и обработку исходной гидрометеорологической информации, включая данные о расходах воды реки Волхов, уровнях воды озера Ильмень, сведения о суточных суммах атмосферных осадков;
- определение притока воды к Волховскому водохранилищу;
- построение прогностических зависимостей для определения притока воды к водохранилищу;
- построение прогностических зависимостей (номограмм) для определения расходов воды в меженный период на р. Волхов;
- выпуск поверочных прогнозов и оценка эффективности методик прогноза.

Объектом исследования является Волховское водохранилище и его сток в меженный период с июля по октябрь.

Для решения поставленных задач в работе используются статистические методы, а также методы, основанные на использовании кривых истощения.

Практическая значимость заключается в разработке эффективной методики для выпуска долгосрочных прогнозов притока воды к водохранилищу, для является важным параметром для гидроэнергетики.

1 Физико-географическое описание бассейна реки Волхов

Общая характеристика территории

Уникальное сочетание разнообразных высокопродуктивных ландшафтов Приильменя является отличительной чертой данной территории.

Рыболовство и рыбоводство, в свою очередь, приносит хорошую прибыль, а также снабжает свежей рыбой не только Северо-Запад России. Несмотря на то, что крупные донные отложения озера практически не используются в промышленности и сельском хозяйстве, они могут быть очень перспективными с точки зрения разработки.

Плодородие пойменных луговых территорий является отличной основой для того, чтобы развивать интенсивное животноводство и производить высококачественные корма [2].

Территория идеально подходит для развития туристической индустрии. Из-за мелководья вода в этом озере прогревается очень быстро, а летом ее температура может быть выше, чем на Черноморском побережье. В сочетании с природными условиями, богатым историческим наследием и бальнеологическими санаториями, Приильмень может рассчитывать на большое будущее как курортный центр. В Перыновом скиту, рядом с Юрьевым монастырем, обнаружены остатки минеральных бальнеологических источников, которые до сих пор почти не исследовались.

Приильмень, в частности, Великий Новгород является крупным индустриальным центром России по производству азотных соединений и электроники, которые приводят к загрязнению окружающей и природной среды.

Для сохранения и безопасного использования этой уникальной природной системы необходима разработка комплексных методов

сохранения здоровья и рационального использования природных ресурсов региона. Изначально, это связано с проблемой сохранения природных водных ресурсов, так как это сильно влияет на обеспечение хозяйственной деятельности, и в частности на процессы, происходящие в природной среде в целом.

Развитие сферы промышленного и сельскохозяйственного производства приводит к исчезновению в хозяйствах целых регионов, так как, не следя за особенностями отношений субъектов природопользования (растительность и фауна) со средой их обитания. Незначительные выгоды переходят многократно увеличивающие их потери. Для Северо-Запада России защита и целесообразная эксплуатация Ильменьской экосистемы имеет огромную ценность, поскольку она является элементом другой более обширной структуры – Невско-Ладожского бассейна.

В наши дни Ильмень превращается в медленно «умирающий» водоем, из-за длительных многолетних процессов заиливания и заноса его ложа речными наносами. В половодье глубина озера достигает 10 м, а в межень от 2 до 4 м.

В поймах рек Волхов, Мета, Ловать в интервале 1970 – начале 1990-х годов из-за значительной мелиорации и системы осушительного дренажа происходило увеличение выноса взвесей с территории притоков.

Для озерного режима отличительной особенностью является стремительный рост уровня воды (по 15 – 35 см/сут.) в первый период половодья и длительный период схода воды с затопленной территории (3 – 5 см/сут.) при его спаде. Продолжительность времени снижения уровней воды с поверхности затопленной территории, кроме заиливания и занесения истока р. Волхов (уменьшение пропускной способности русла), способствуют:

- 1) подпоры, которые создаются со стороны Волховской ГЭС, особенно после 1951 года, когда на плотине была возведена надстройка высотой 2 м;

2) заиливание Вишерского канала, перехватывающего часть стока наносов реки Меты и выносящего их по рекам Вишера и М. Волховец ниже города Новгорода в проточную зону реки Волхов;

3) разрушение существующей гидрографической сети на пойме, приводящее к застою паводковых вод.

Данные исследований отражают, что в течение 1923 – 1994-х лет в истоке р. Волхов наблюдалось занесение русла, глубины уменьшились в среднем на 0.5 – 1.0 м, дно озера поднялось до отметок 14.4 – 14.8 м БС. К изменению пропускной способности истока реки привело уменьшение площадей живых сечений русла реки в диапазоне отметок 14 – 18 м на 300 – 600 м². Расходы воды уменьшились на 100 – 200 м³/с, а продолжительность затопления поймы озера Ильмень и р. Волхов увеличилась на 5 – 10 дней. 1987 год является наиболее аномальным в этом отношении, тогда вода в пойме от половодья сошла только в июле, но в августе за счет многозначительных осадков пойма вновь затопилась [2].

Затопления Волхов-Ильменской поймы из-за уменьшения пропускной способности Волхова и увеличение сроков и площадей приводит к целому ряду негативных последствий:

1) Процессы накопления загрязняющих веществ, особенно нитритов формируют мелководный бар отложения наносов в истоке Волхова, которое приводит к ухудшению свойств воды в реке и ограничениям в водоснабжении населения города Великий Новгород. Также происходит формирование на дне застойных участков, зараженных, например, кишечными палочками, и массовым заболеванием донной рыбы гельминтозом.

2) Долгая продолжительность затопления поймы способствует понижению продуктивности пойменных земель, а также возможно появление патогенных зон и, как следствие, возникновение эпидемий, упадок продуктивности рыбного хозяйств, нехватка воды для обеспечения

Волховской ГЭС, ухудшение судоходства, уничтожение памятников культуры вследствие их подтопления.

Данные эколого-гидрологических организаций, которые были получены в результате исследований показывают, что на территории Приильменя возникла критическая ситуация.

Решением главного вопроса является разработка комплекса мероприятий по увеличению пропускной способности р. Волхов. Основные решения – это углубление русла, особенно в зоне фарватера, осуществление расчистки поймы гидрографической сети и регулирование расположения дамб, дорог и других инженерных сооружений, связанных с ликвидацией застойных участков поймы и создания увеличенной пропускной способности во время паводков.

Но есть и иные варианты решения задачи, все это требуют предварительных и весьма тщательных исследований. Исходя из недостаточной изученности этого вопроса возможен переход к неизбежным негативным последствиям, и пренебрежение этого вопроса приведет к экологическим проблемам. Экологическое напряжение вызвано обмелением русла реки Волхов по всей территории её протекания, большим заилением части озера, изменением химического состава воды, нарушением водоснабжения, увеличением риска образования патогенных зон, снижением рыболовства, исчезновением пойменных лугов.

Можно утверждать, что возникла ситуация для немедленного проведения определенных работ по увеличению пропускной способности р. Волхов. Проведение работы представляют собой комплексную водохозяйственную задачу, которая состоит из следующего:

- 1) Обеспечение чистого водоснабжения населения г. Великого Новгорода, оптимизацией уровненного режима оз. Ильмень;
- 2) Оптимизации эксплуатации Волховской ГЭС без повышения уровней воды в озере;

- 3) Создания продуктивного землепользования в Приильменье, особенно в его пойме;
- 4) Строительства и эксплуатации каналов, дамб, польдеров и других гидротехнических сооружений на его пойме;
- 5) Улучшения условий судоходства;
- 6) Восстановления флоры и фауны;
- 7) Плана комплекса мер по предотвращению разрушения памятников культуры при их подтоплении.

В настоящее время на рассматриваемой территории отсутствуют виды редких животных, птиц и рыб. По сведениям местных жителей, здесь восстановились нерестилища снетка, пеляди, судака. Также можно наблюдать таких водоплавающих птиц как лебедь, журавль, гусь.

Умеренно континентальные условия климата, в которых наблюдается мягкая зима и прохладное лето, определяются в основном воздействием Западного переноса. Ближайшая метеостанция находится в г. Новгороде. Среднегодовая температура воздуха составляет 3.9°C, абсолютный минимум зафиксирован при температуре минус 45 °С, абсолютный максимум при плюс 34 °С.

Начало апреля – это время перехода температуры через 0 °С весной, а первая декабрь ноября – осенью. Период отрицательной температуры продолжается 213 суток, а период положительной температуры – 127 дней. Наименьшая продолжительность положительной температуры – 92, а наибольшая – 164. Среднегодовая температура почвы равна 5 °С, промерзание почвы варьируется от 56 до 105 сантиметров. Относительная влажность воздуха за год составляет равна 81% (среднее значение).

Среднее годовое количество осадков составляет 670 – 700 мм. Из них на теплый период года (апрель-октябрь) приходится 425 – 450 мм. Годовой минимум осадков характерен для февраля – марта (27 – 28 мм), максимум – для июля – августа (80 – 83 мм). Осенью наблюдается 16-17 дней с осадками.

Суточный максимум осадков 1% – обеспеченности составляет 75 мм.

Средняя дата появления снежного покрова – 30 октября, образование устойчивого покрова – 6 декабря. Разрушение снежного покрова происходит 14 апреля. Число дней со снегом составляет 136. Среднее количество дней с оттепелями – 25.

Южное, юго-западное является основными направлениями ветра в течение года. Средняя скорость ветра в январе до 5.8 м/с, наименьшая – 3.9 м/с в августе. В период открытого русла наблюдаются ветры юго-западного направления со скоростями до 5 м/с. Максимальная скорость ветра достигает 17 м/с.

По многолетним данным среднегодовая скорость ветра в Новгороде составляет 4.8 м/с. Наблюдается шелоник – это ветер, дующий вдоль озера Ильмень с южного (юго-западного) направления. Шелоник повторяется осенью (43%) и зимой (40%), к лету он уменьшается до 27%. Реже всего наблюдается восточный ветер, повторяемость которого в каждом периоде года не превышает в среднем 8%, в отдельные месяцы – 10 %.

Климат приозерного типа формируется под влиянием всей площади озера Ильмень. Влияние озерного климата наблюдается в береговой полосе шириной от 5 до 10 километров, а наиболее заметно на восточном и юго-восточном побережьях.

У современного мелководного озера Ильмень наблюдается плоское дно, сложенные 9 – 10-метровой толщиной ила. Морфометрические характеристики озера сильно меняются вследствие значимых внутригодовых и межгодовых колебаний уровней в условиях плоской низменной поймы. Коэффициент условного водообмена озера Ильмень по данным В.А. Кирилловой равен 4.3. Это означает, что за год вода в озере сменяется четыре раза, тогда как в Ладожском озере весь водообмен происходит за 12 лет.

Озеро Ильмень дренирует площадь 67200 км². В него впадают 19 рек длиной более 10 км и несколько сотен ручейков. Водные объекты на территории Приильменья полноводны, так как они образованы остаточными ледниковыми озерами, а также влияют климатические особенности

(преобладание осадков над испарением). На территории наблюдается неравномерное расположение рек и озер. Обилие озер на восточной части, многие из них относятся к устьям рек Мста и Ловать и являются лиманами озера Ильмень (Печорское, Опархино, Ситное, Мокрицкое и другие). Речная система больше развита на западе.

Самая крупная река Приильменья – это Волхов. Она соединяет два больших озера Северо-Запада европейской части России – Ильмень и Ладожское. Длина реки – 228 км, площадь водосборного бассейна – 80 200 км². За год объем выноса реки в Ладогу в среднем около 17 км³ воды.

Ловать – это самая длинная река из впадающих в озеро Ильмень. Исток реки находится в озере Ловати, расположенном в Белоруссии, на высоте 110 м над уровнем моря. Длина реки от истока до устья составляет 550 км, площадь водосборного бассейна – 21900 км². Ловать пересекает три области: Витебскую, Псковскую и Новгородскую.

Кроме реки Ловать с юга в Ильмень впадают реки Пола и Полисть. Вместе с рекой Ловать они образуют общую обширную дельту площадью около 400 км².

В устьях рек Мста и Ловать и на северо-западе находятся большие болотные территории. Торф является основной водовмещающей породой.

Размеры водоносного торфа в основном составляет 1.5 – 3 метра. Восполнение водоносного горизонта происходит за счет атмосферных осадков. Дренаж болотных территорий производится естественными путями – ручьями и реками.

Наблюдается быстрое промерзание озера из-за малой глубины, особенно рядом с берегом, где вода, быстро охлаждаясь, создает условия для появления сала, которое в большинстве случаев переходит в лед, минуя стадию плавающего льда.

Шелоник также оказывает влияние на замерзание озера. Иногда ветер взламывает только что затянувшуюся льдом поверхность и выносит лед в Волхов. Характеристики ветра объясняют неодновременность начала

ледостава в разных районах озера. При достижении толщины 15 – 18 сантиметров воздействие ветра не влияет и лед продолжает крепнуть.

С 10 по 20 апреля начинается вскрытие озера. Изначально происходит в северо-восточной части озера, а через 6 – 7 дней в районах дельт основных притоков. На вскрытие озера влияет температурный режим, солнечная активность, изменения уровней воды и скоростей ветра. Среднее многолетнее значение от вскрытия до полного очищения ото льда составляет 14 – 19 дней, затягиваясь иногда до 25 – 30 дней.

Уровненный режим оз. Ильмень и р. Волхов характеризуется величиной приточности и регулирующей способностью как озера, так и поймы реки. Начиная с 1926 года Волховская ГЭС начала влияет на уровненный режим, в основном главные фазы колебаний уровня определяются естественным режимом, и периодом работы ГЭС. Уровненный режим определяется ясно выраженным весенним половодьем с максимумом в первой декаде мая. В первых числах апреля начинается увеличение уровней, спад уровней длится до сентября. Средние скорости подъема уровня – 10 см/сутки, спад – 5 см/сутки. В некоторые годы понижение в озере замедляется дождевыми паводками, и июльского понижения, начинается второе повышение уровня в августе и сентябре. В основном наибольшее понижение наблюдаются в августе-сентябре, а после вновь повышение, которое длится до декабря. В январе уровень почти не меняется, а феврале-марте наблюдается понижение уровня. Многолетний средний уровень воды в озере за период 1926 – 1979 гг. – 18.44 м, наибольший – 23.03 м, наименьший – 15.68 м БС (1882 г.).

Значение отметок уровня воды выше 18.00 м БС в среднем за год составляет около 70 суток (от 25 до 122 суток).

Средняя длительность навигации 180 суток. Высота волны озера равна двум метрам.

Наименьший уровень, гарантированный условиями судоходства и рыболовства, составляет 17.50 м. При этом уровне гарантированная площадь

живого сечения русла должна составлять 800 м^2 , а расход воды $450 \text{ м}^3/\text{с}$. В створе гидрологического поста г. Великий Новгород максимальный среднемесячный расход в период половодья – $2140 \text{ м}^3/\text{с}$, минимальный в период межени – $60 \text{ м}^3/\text{с}$.

Затруднения для стока на данном участке реки служит площадь живого сечения русла. Наибольшие из них влияют на необходимую пропускную способность русла реки и вносят участки бара в самом истоке Волхова.

С конца мая до конца июня длится период наибольших уровней, колеблясь в интервале от 15 до 40 дней. Наименьшие уровни (в среднем 17.5 – 18 м) с октября по ноябрь в течение 30 – 60 дней (в среднем около 45 дней). С вероятностью около 1 – 3 раз в 100 лет (обеспеченность 95 – 99, или 1 – 5 %) наибольший уровень может составлять 23.1 м, а наименьший 15.5 м. В наши дни уровненный режим в Ильмене регулируется Волховской ГЭС.

Значения минимальных отметок дна в истоке на уровне 14.5 – 10.0 м, средние – на отметке 16 м. Это показывает, что один раз в 15 – 20 лет в районе бара уровень в Ильмене по некоторым створам будет падать ниже среднего уровня дна реки (16 мБС). При этом в городе Новгороде на водозаборном сооружении, который расположен ниже опор недостроенного моста, происходит недостаточное поступление воды на срок от 5 до 20 дней. Осуществление подачи воды в исток реки Волхов будет происходить по Сиверсову каналу.

Средние наименьшие отметки дна озера и дна в русле в истоке р. Волхов находятся на уровне 13.5 м БС.

Сокращение площадей сечения русла реки за последние 20 – 30 лет вызвало, то поступающий приток озер, не обеспечен необходимым и для его стока руслом. В следствии этого наблюдается дополнительный подъем уровня воды и соответствующий ему рост расходов. Это приращение уровня осуществляет нормальную эксплуатацию Волховской ГЭС минимальный расход в $450 \text{ м}^3/\text{с}$, приводит к площади затопления поймы на $200 – 300 \text{ км}^2$. Для поддержания такого приращения уровня из-за плоскостного характера

поймы требуются большие объемы воды на заполнение территории. При этом увеличиваются дефицит воды на испарение, фильтрацию т.п.

С мая по сентябрь происходит дополнительный дефицит воды на испарение с этих площадей при испарении с водной поверхности 5 мм/сутки ($10-30 \text{ м}^3/\text{с}$ – это 5-10% от летнего расхода воды в истоке Волхова). Далее потери стока сильно возрастают при увеличении уровней, а в следствии площадей затопления. Из-за роста этих потерь сток реки Волхов уменьшается. В следствии при занесении русла необходимого увеличения уровня воды в озере для полного восстановления стока не происходит. Стоковые воды пропадают на пойме, что приводит к ее подтоплению. Тем не менее для основательного заключения этого вопроса нужны дополнительные исследования. Следовательно для эксплуатации Волховской ГЭС и водозабора качественной воды без дополнительного подтопления поймы является увеличение площадей живого сечения реки путем частичной расчистки грунта в зоне русла. Вернее, наиболее глубокой его части с значительным водообменом – зоны фарватера.

Значения минимальных отметок дна русла реки в истоке варьируется от 10 до 14.2 м БС. Есть участки отмелей, где скорость ограничена и наблюдаются застойные явления (противоток). Преимущественно эти зоны выделяются на обширном участке истока Волхова в районе Перынов скит – Козынева. По данным расчетов, для гарантированного обеспечения необходимой пропускной способности русла нужно, чтобы соответствовали площади живых сечений русла до 800 м^2 , которые обеспечивают необходимую пропускную способность русла.

Краткая гидрологическая характеристика р. Волхов и Волховского водохранилища

Волховская ГЭС находится на р. Волхов. Исток реки берет на озере Ильмень, а устье располагается в Ладожском озере (см. рисунок 1.1). Длина

реки составляет 224 км. Гидроузел расположен в 27.5 км от Ладожского озера. Главная особенность реки – наличие нескольких порожистых участков, из которых наиболее значительные Пчевские и Петропавловские пороги. Средний уклон реки – 0.06 %.

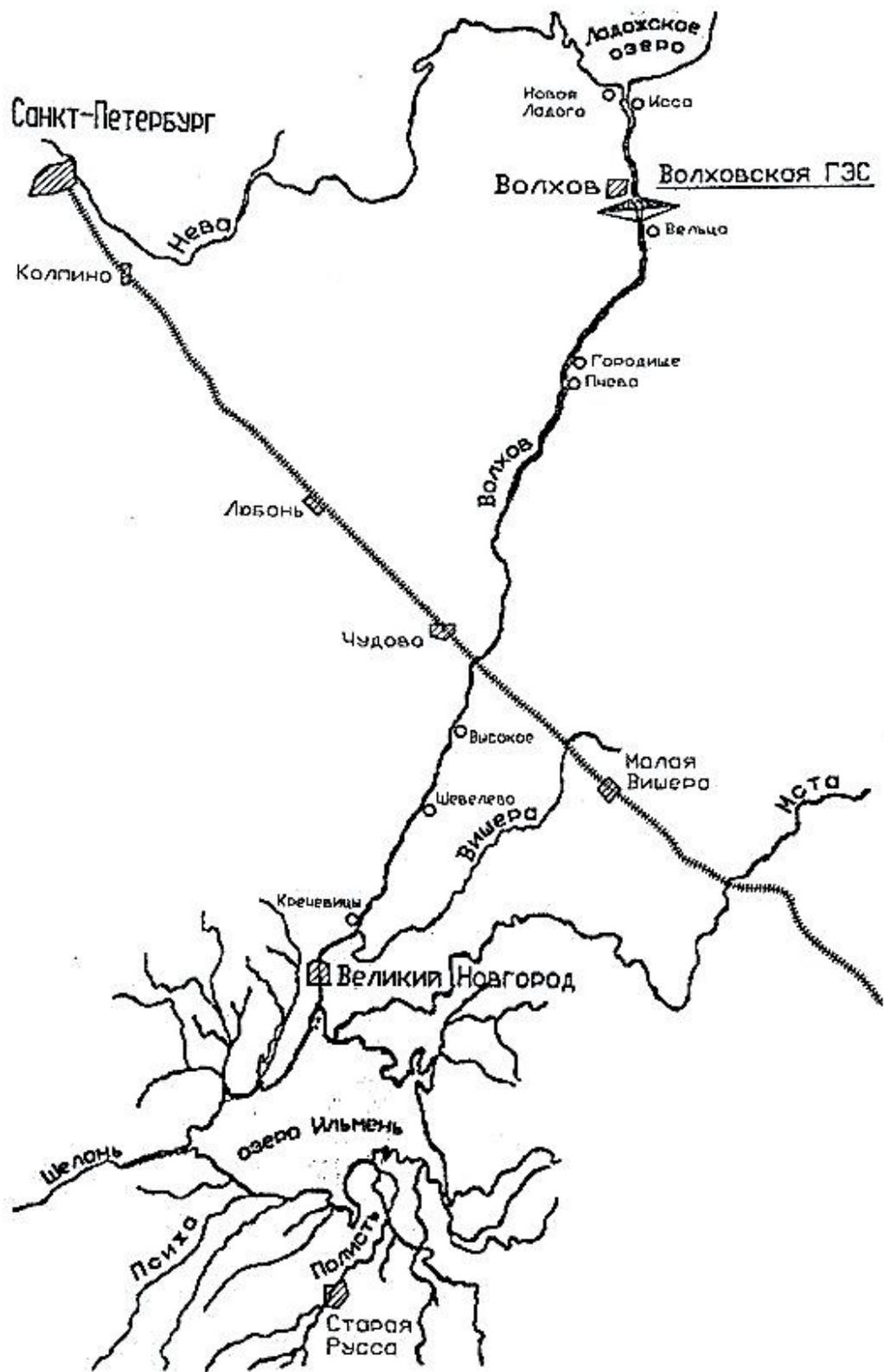


Рисунок 1.1 – Схема расположения Волховского водохранилища

Площадь водосбора реки в устье составляет 80200 км², в створе Волховского гидроузла – 79800 км². Озеро Ильмень – это главный источник питания реки Волхов. Наиболее значимые притоки, впадающие в озеро: Мста, Пола, Ловать, Шелонь, Полисть. Вытекает из озера Ильмень одна река Волхов.

Приильменная или Волхово-Ловатская – наибольшая часть территории с отметками от 0 до 50 м БС, на которой находится котловина, занятая озером Ильмень.

Лес занимает 60 – 70% территории, а болота и заболоченные земли около 10%. Приильменная низина характеризуется заболоченностью. В долине реки Волхов, на побережье оз. Ильмень и в низовьях рек, впадающих в озеро, находится две большие территории заливных лугов. Озерность бассейна р. Волхов составляет 1.8 – 2.8 %.

Озеро Ильмень ледникового типа характеризуется блюдцеобразной формой котловины и имеет низкие, заболоченные берега. Средняя глубина озера – 4.5 метра, наивысшая – 10 метров. Исключительная характеристика озера Ильмень – это изменение площади зеркала при изменении наполнения. Площадь зеркала варьируется при горизонтах воды 16.0 – 23.9 м от 660 км² до 2180 км².

Устье реки Волхов протяженностью 26.5 км расположено в переменном подпоре от Ладожского озера.

Зависимость уровней нижнего бьефа Волховской ГЭС от уровней Ладожского озера при различных расходах воды приведена в приложении А.

Река Волхов – это равнинная река, со смешанным типом питания с преобладанием снегового. Режим реки Волхов характеризуется режимом притоков озера Ильмень и его регулированием, а также режимом притоков реки Волхов. К тому же, Волховская ГЭС влияет на режим реки Волхов и озера Ильмень.

Естественным регулятором выступает 83 % стока, который сбрасывается на Волховской ГЭС, поступающего из озера Ильмень.

Длительность стояния уровней озера на различных отметках характеризуется не только водностью года, но и высотой пика половодья (дождевых паводков).

Увеличение уровней оз. Ильмень зависит от приточности и интенсивности снеготаяния и достигает 35 см/сутки. Уменьшение уровней озера Ильмень напрямую зависит от пропуска воды на порогах и в среднем значения в интервале 3 – 5 см/сутки.

Сезонное регулирование стока не изменилось после возведения ГЭС, в сравнении с естественными условиями. Из-за необходимости поддержания навигации в маловодные годы при уровнях озера ниже 17.5 м приходится производить поднятие уровней водохранилища в этот период, чтобы уменьшить сработку озера до конца навигационного периода.

Подпор от плотины гидроузла при НПУ – 15.74 м находится на ближайший к плотине 10-ти километровом участке, который расположен выше по течению.

Вследствие регулирующего влияния озера Ильмень, половодье на р. Волхов имеет плавный характер с относительно плавным увеличением и замедленным снижением.

Продолжительность половодья в среднем и нижнем течении длится от апреля до августа. Максимальные годовые расходы воды на р. Волхов в апреле – мае (период весеннего половодья).

После кратковременной межени начинается осенний подъем уровней от дождей, который длится до первых ледовых образований. Зимняя межень наблюдается с конца ноября до начала апреля.

Многолетние характеристики годового стока р. Волхов в створе Волховской ГЭС определены за период с 1981 по 2023 г. и приведены в приложении Б.

Нормы стока, взятые на разных стадиях проектирования практически не меняются (максимум на 5 – 6 %).

Сток в течение года неравномерен, около 50 % стока проходит в период весеннего половодья, ~30 % в летне-осеннюю межень и ~20 % в зимнюю межень.

Максимальные годовые расходы воды р. Волхов наблюдаются обычно в апреле – мае.

Наибольший годовой суточный приток в водохранилище зафиксирован 6 мая 1966 г. равным 2651.9 м³/с.

Только в 1908, 1923 и 1952 г. максимумы осенних паводков превысили максимальные расходы весеннего половодья.

Для расчета многолетних характеристик максимальных среднесуточных расходов притока р. Волхов и минимальных летних и зимних расходов были взяты данные наблюдений.

С 1923 по 1974 год в истоке р. Волхов были зафиксированы значительные изменения в водном режиме. В следствии изменения условий эксплуатации плотины ГЭС, от первоначального плана (устройство надстройки), произошло подтопление поймы оз. Ильмень. Пострадали большие территории сельскохозяйственных угодий. Возникла потребность более эффективного сельскохозяйственного использования территории Волхов-Ильменской поймы создание в 1976 г. новых «Временных основных правил использования водных ресурсов водохранилища Волховской ГЭС им. В.И. Ленина и оз. Ильмень». На основании этих новых «Правил...» гидравлический режим водотока приближен к естественному. Однако одними эксплуатационными мероприятиями по регулированию водных ресурсов оз. Ильмень нельзя восстановить уничтоженные пойменные земли. В 1980 г. были в стадии разработки ТЭО мероприятий по использованию и охране водных ресурсов Волхов-Ильменской поймы Новгородской области, где были представлены варианты мероприятий по сельскохозяйственному использованию утраченных земель. Была поставлена задача о рациональности очищения русла р. Волхов на ограничивающих его водный режим участках (исток реки). В 1988 г. сделана ориентировочная оценка

влияния русловых процессов на пропускную способность р. Волхов. В 1994 г. разработаны планы дноуглубительных работ в истоке реки. Эти планы в силу ряда причин (в первую очередь, развал СССР) так и не были реализованы. В связи с этим в 2000 г. вновь встал вопрос о создании плана, но уже на всю зону истока р. Волхов.

Согласно имеющимся данным ширина русла в истоке Волхова меняется от 300 до 800 метров, наименьшие отметки дна в зоне фарватера находятся на уровне 10 метров, а наибольшие 14.5 м БС.

В устье р. Волхов с правого берега располагается Сиверсов канал, выше – реки дельты р. Мста (Большая и Малая Гнилки), с левого – Ракомка и другие.

2 Методика долгосрочных прогнозов стока и уровней воды в период межени

В период летне-осенней и зимней межени для обеспечения нужд энергетики и водного хозяйства выпускаются долгосрочные прогнозы сезонного (меженного) стока, а также квартального и месячного притока воды в водохранилище. Кроме того, подобные прогнозы могут быть использованы для расчетов смешения и разбавления сточных вод при решении экологических задач.

К другим прогнозам в этот период относятся прогнозы средних и минимальных месячных уровней воды на судоходных реках. Важность таких прогнозов связана с обеспечением уровней воды, при которых возможно судоходство [3].

В настоящее время методики прогноза притока воды еще нуждаются в уточнении. Связано это с тем, что в зонах избыточного и достаточного увлажнения приток во многом определяется количеством выпадающих атмосферных осадков, прогноз которых дается с небольшой заблаговременностью и невысокой точностью.

Определение притока воды к водохранилищам

Полезно используемый приток за интересующий период времени (месяц, квартал) вычисляется с учетом продолжительности периодов, когда расход воды в реке превышал максимальный расход ГЭС и периодов, когда он был меньше этого расхода.

Среднее значение полезно используемого притока определяется по формуле:

$$Q_{\Pi} = \varphi_1 Q_T + \varphi_2 Q, \quad (2.1)$$

где Q_{Π} – среднее значение полезно используемого притока воды за интересующий период Q_{Π} :

Q_T – максимальный пропускной расход через турбины ГЭС, м³/с;

Q – средний расход воды в реке за период, когда он был меньше Q_T ;

$\varphi_1 = n_1/N$ – n_1 – число дней, в течение которых приток воды был больше пропускного расхода ($Q > Q_T$);

$\varphi_2 = n_2/N$ – n_2 – число дней, когда приток воды был меньше ($Q < Q_T$);

$N = n_1 + n_2$ – продолжительность расчетного периода (месяц, квартал) в днях.

Если расход притока больше максимальной пропускной способности ГЭС, то полезно используемый приток будет равен ему. Если же расход притока меньше, то он будет равен среднему значению естественного расхода воды в реке.

Методические основы прогнозирования притока

В основе методов прогноза лежит представление процесса истощения запасов воды в речном бассейне [3]. Как уже указывалось выше для районов достаточного и избыточного увлажнения прогнозы по данной методике вызывают затруднения, которые связаны с тем, что меженный период прерывается дождевыми паводками. Сложности связаны и с недостаточностью гидрометеорологических данных.

В настоящее время используются два подхода к разработке методик притока. В основе первого подхода лежит уравнения истощения. В основе второго – использование корреляционного анализа с учетом закономерностей истощения запасов воды в бассейне и стока, обусловленного осадками.

Процесс истощения описывается экспоненциальным уравнения с двумя параметрами:

$$Q(t) = (Q_0 - q)\exp(-\alpha t) + q, \quad (2.2)$$

где $Q(t)$ – расход за период времени t ;

Q_0 – начальное значение расхода воды;

q – минимальный расход, обусловленный грунтовым питанием, $\text{м}^3/\text{с}$;

t – время в сутках, отсчитываемое от того момента времени t_0 ;

α – интенсивность истощения сезонного запаса подземных вод;

\exp – основание натуральных логарифма.

Уравнение 2.2 описывает процесс истощения запасов воды в бассейне. Из этого уравнения следует, что существует линейная зависимость между расходами, вычисленными за смежный период:

$$Q_{n+1} = \alpha Q_n + (1 - \alpha)q, \quad (2.3)$$

где Q_n – средний расход воды за предшествующий период T (декада, месяц);

Q_{n+1} – средний расход воды за последующий период T (декада, месяц);

α – угловой коэффициент, равный $\alpha = \exp(-\alpha T)$.

Из уравнения 2.2 следует, что средний расхода линейно связан с начальным расходом

$$Q_T = kQ_0 + (1 - k)q \quad (2.4)$$

где Q_T – средний расход за период времени T ;

$$k = [(1 - \exp(-\alpha T))/(\alpha T)]. \quad (2.5)$$

Уравнение 2.4 позволяет выполнить расчет и прогноз как суммарного меженного стока, так кварталных и месячных расходов притока. Методики, основанные на этом походе, эффективны для районов, где дождевое питание в межень незначительно [3].

Для районов в существенным влиянием дождевого питания успешность прогнозов будет зависеть от размера бассейна водотока, для которого разрабатывается методика, а также от величины атмосферных осадков и их изменчивости. Если количество осадков существенно изменяется год от года для разработки методики лучше использовать дискриминантный и регрессионные анализ.

При разработке методик прогнозирования меженных уровней используются такие же подходы. В аридных районах для прогноза может быть использована кривая истощения. В увлажненных районах строятся эмпирические (статистические) зависимости.

Методика прогноза сезонного меженного стока

Разработка методики прогнозов базируется на уравнениях, представленных в п. 2.2 и состоит из нескольких этапов.

На первом этапе производится подготовка исходных гидрометеорологических данных, которая, в частности заключается в выделении дождевой составляющей в рядах стока и ее срезки (при необходимости).

На втором этапе строится линейная зависимость среднемесячных (или среднедекадных) расходов воды от расходов за предшествующий месяц следующего вида

$$Q_{n+1} = aQ_n + b, \quad (2.6)$$

и определяются ее параметры a и b .

Третий этап включает определение параметров истощения стока с учетом продолжительности расчетных периодов (месяца или квартала)

$$\alpha = \ln a/T \quad \text{и} \quad q = b/(1 - a) \quad (2.7)$$

где α – интенсивность истощения сезонного запаса подземных вод;

q – минимальный расход, обусловленный грунтовым питанием, м³/с;

T – период, за который вычисляется средний расход.

На следующем (четвертом) этапе обычно рассчитываются статистические характеристики (среднее и СКО) стока, формируемого за счет снеготаяния или дождей.

Для районов избыточного и достаточного увлажнения методику корректируют путем построения уравнения истощения строят для гарантированных расходов воды, а дополнительный сток учитывают в виде «добавок», вычисляемых за многолетний период. Нередко для «добавок» строят кривые обеспеченности, которые позволяют определить погрешности и выпускать прогнозы в вероятностной форме.

На последнем (пятом) этапе проводится оценка эффективности методики и оправдываемости выпущенных поверочных прогнозов [3].

Методика прогноза месячного стока по данным о предшествующих расходах воды

Среднемесячный сток прогнозируется с заблаговременность в один месяц. В основе методики лежит построение зависимости $Q_{n+1} = f(Q_n)$ для каждого отдельного месяца. Такой подход может дать лучшие результаты, чем построение общей зависимости, так как рассматриваются более близкие значение во времени. Кроме того, это дает возможность учесть запасы воды в русловой сети и влияние осадков. Следует иметь в виду, что существует

опасность получить ложную корреляцию, поэтому при ее построении лучше использовать как можно более продолжительный ряд наблюдений.

В качестве исходных могут быть использованы как непосредственно рассчитанные среднемесячные расходы, так и осредненные за более короткий срок или, например расходы за 25-ое число. Это допустимо для не очень крупных рек, когда влияние на сток атмосферных осадков не очень велико. Высокий коэффициент корреляции таких зависимостей может говорить о малом изменении стока от месяца к месяцу, когда, по сути, прогнозы по методике заменяется инерционным прогнозом ($S/\sigma_{\Delta} \sim 1$). Характер зависимостей $Q_{n+1} = f(Q_n)$ для небольших водотоков чаще всего линейный.

При существенном вкладе дождевой составляющей на качество методик большее внимание будет оказывать прогноз этой составляющей [3].

При прогнозах квартального стока используется уравнение связи его с начальным средним расходом за данный квартал $Q_{\text{кв}} = f(Q_0)$. Надежные зависимости имеют место, когда в качестве начального используется средний расход за предшествующий месяц.

Прогнозы стока по данным о запасе воды в русловой сети и осадкам

Эмпирические связи вида $Q_{n+1} = f(Q_n)$ для крупных рек с большим временем добегания и существенной долей дождевого питания часто недостаточно надежны. Связано это, прежде всего, с неравномерностью выпадения осадков как во времени, так и по обширной территории речного бассейна. В этом случае более подходящим предиктором будет являться не величины предшествующего расхода, а запас воды в русловой сети $Q_{n+1} = f(V_{t0})$ [3], который может быть выражен в единицах объема, так и расхода воды.

Характер таких зависимостей чаще всего линейный. В общем виде такие зависимости выражаются уравнением

$$Q_{t-t_0} = aV_{t_0} + V_{\text{мин}} \quad (2.8)$$

где Q_{t-t_0} – средний расход за месяц или квартал, м³/с;

V_{t_0} – запас воды в руслах речной системы на момент времени t_0 ,
т.е. на дату выпуска прогноза;

$V_{\text{мин}}$ – запас воды, обусловленный устойчивым (глубинным)
подземным питанием;

Дождевая составляющая может быть определена двумя способами. Первый способ заключается в расчете гарантированного стока и приближенном расчете дождевой составляющей. Средний расход воды будет определяться по формуле

$$Q_{t-t_0} = Q_{\text{гар}} + Q_{\text{д}}' \quad (2.9)$$

где $Q_{\text{д}}'$ – ожидаемая (вычисленная) дождевая или тало-дождевая составляющая стока, м³/с.

Второй способ заключается в проведение статистического анализа и определение параметров связи месячного или квартального стока, начальным запасом воды в русловой сети и количеством осадков, определяющих дождевую составляющую стока, т.е. $Q_{t-t_0} = f(V_{t_0}, X)$.

При определении количества осадков, используемых в зависимости, важным моментом является установление стокообразующего периода. Его продолжительность определяется путем совместного анализа хронологических графиков атмосферных осадков и гидрографов стока. Как показывает опыт их построения, для малых рек время добегания не превышает 15 суток и при построении зависимостей берутся осадки за предшествующий месяц. На крупных реках, где время добегания может составлять 30 суток, бассейна разбивают на несколько частей. Для наиболее удаленной части бассейна используют осадки за предшествующий месяц, а

для части бассейна вблизи замыкающего створа – используют осадки за одну – две предшествующие декады. В этом случае расчет осадков производят по формуле

:

$$X = \varphi_1 X_1 + \varphi_2 X_2 + \varphi_3 X_3, \quad (2.10)$$

где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – доли площадей бассейна в порядке увеличения времени пробега воды до замыкающего створа;

X_1, X_2, X_3 – среднее значение суммарного слоя осадков для соответствующих площадей за указанные выше периоды времени;

При прогнозах квартального стока подобные зависимости строят с учетом осадков, выпавших в начале или середине квартала.

При построении зависимостей вида $Q_{t-t_0} = f(V_{t_0}, X)$ важно определять количество атмосферных осадков по как можно большему числу метеостанций на водосборе.

Методики прогноза уровней воды

Для прогноза уровней воды в период межени используются те же приемы, что и при прогнозе расходов воды, так как существует тесная связь между расходами и уровнями. Как и в случае с расходами строятся зависимости уровней в текущий момент времени от расходов воды, объемов воды и атмосферных осадков в предшествующие периоды:

$$H_n = f(Q_{n-1}); H_n = f(Q_{n-1}, X) \text{ или } H_n = f(V_{t_0}, X) \quad (2.11)$$

где H_n – средний уровень в интересующий месяц;

Q_{n-1} – средний расход за предшествующий месяц или за последнюю

его декаду;

X – осадки за стокообразующий период;

V_{t0} – начальный запас воды в русловой сети.

Отличие состоит в том, что для уровней воды такие зависимости обычно нелинейные.

В зонах недостаточного увлажнения хорошие результаты могут быть получены по уравнениям истощения. В зонах избыточного и достаточного увлажнения необходимо привлекать информацию об атмосферных осадках, пользуясь такими же рекомендациями, как и при разработке методом прогноза стока.

3 Прогноз притока в Волховское водохранилище

Определение притока воды в водохранилище

Приток воды в водохранилище подсчитывается одним из двух способов – по сумме расходов впадающих рек или по уравнению водного баланса. Зависимость с притоком имеет то преимущество, что предсказанная на ее основании величина может быть непосредственно использована при управлении работой водохранилища. Однако величина притока, подсчитанная по стоку рек, включает ряд неточностей, обусловленных главным образом тем, что гидрометрическими створами контролируется не вся водосборная площадь.

Кроме того, величина притока состоит в той или иной мере из разнородных по происхождению частей стока впадающих рек вследствие несовпадения во времени фаз режима больших и малых рек, из-за различной лесистости и заболоченности водосборов и пр. Все это снижает качество прогностических зависимостей. Как правило, предпочтительно устанавливать прогностические зависимости для отдельных рек, затем по предсказанному стоку рек переходить к притоку в водохранилище. При этом выбор рек должен соотноситься с принятым способом подсчета притока.

В связи с тем, что в р. Волхов впадают незначительные притоки, определение притока осуществлялось методом водного баланса.

Сущность данного метода подсчета притока основывается на том, что уравнение водного баланса водохранилища решается относительно искомой величины. Если такой величиной служит полезный приток в водохранилище (поверхностный и подземный приток плюс осадки минус испарение), то

$$\bar{Q}_{\text{пол. пр.}} = \bar{Q}_{\text{см.}} + \frac{(\bar{W} - \bar{W}') \cdot 10^3}{86.4 T} \quad (3.1)$$

- где $\bar{Q}_{\text{пол. пр.}}$ — приток воды в водохранилище в виде среднего расхода ($\text{м}^3/\text{с}$) за интервал времени T сутки;
- $\bar{Q}_{\text{ст.}}$ — сток из водохранилища (включая забор воды на орошение, водоснабжение и другие нужды);
- $W_{\text{нач}}$ и $W_{\text{кон}}$ — объем воды в водохранилище на начало и конец интервала времени T , млн. м^3 .

В уравнении (3.1) разность объемов

$$\Delta W = \Delta W_{\text{вх}} = W_{\text{кон}} - W_{\text{нач}} \quad (3.2)$$

есть аккумуляция воды в чаше водохранилища.

Принимая, что площадь водного зеркала в пределах многолетней амплитуды колебаний уровня постоянная, имеем

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{ст}} + \frac{0.01 \Delta H * F * 10^6}{86400 * 30.5} \quad (3.3)$$

где ΔH — изменение H за месяц, см

F — площадь водного зеркала, км^2 .

Допуская постоянной площадь зеркала озера:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{р Волхв ГЭС}} + 0.38 (W_{\text{кон}} - W_{\text{нач}}) \quad (3.4)$$

Техника определения притока сводится к следующему. Величина стока реки Волхов используется по данным Ленэнерго, подсчитанным по характеристикам турбин водосливов и других неплотностей сооружений.

Определение ΔH или $W_{\text{кон}}$ и $W_{\text{нач}}$, сводится к определению уровня на начало и конец месяца. Это встречает ряд трудностей. При определении притока интересует колебания, обусловленные изменением объема воды.

Уровень же на водных постах крупного водоема, колеблется не только от изменения объема воды в нем, но и в связи с ветровыми сгонами и погонами.

Если пост находится в устье реки, впадающей в водоем, то уровень колеблется также в связи с заторами, зажорами, половодьем и паводками.

В связи с этим необходимо установить уровень по данным постов:

а) по всем постам в одинаковом масштабе вычерчиваются совмещенные графики колебаний ежедневных уровней;

б) графики сглаживаются;

в) по сглаженным графикам снимается H на стыках месяцев и определяется $\Delta H = H_{\text{кон}} - H_{\text{нач}}$;

г) измерения записываются в сводную таблицу.

Вычисляются средние ΔH , которые подставляются в выражение для водохранилища Волховской ГЭС. Кривая объемов, используемая для подсчета отнесена к абсолютным отметкам оз. Ильмень. Но отметки нулей графиков постов на оз. Ильмень увязаны между собой плохо.

Поэтому поступают следующим образом. За $H_{\text{нач}}$ принимается наблюденный сглаженный уровень H по Новгороду

$$H_{\text{кон}} = H_{\text{нач}} + \Delta H_{\text{ср}} \quad (3.5)$$

За $H_{\text{нач}}$ для следующего месяца принимается наблюденный уровень, а не вычисленный.

На основании данной методики была определена величина притока.

Информация об уровнях воды на оз. Ильмень у г. Новгород представлена в таблице 3.1. Исходными данными служили значения, приведенные в гидрологических ежегодниках [4], а также в электронном ресурсе «Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов» [5].

Таблица 3.1 – Уровни воды р. Волхов у г. Новгород

Год	Уровни р. Волхов – г. Новгород, см						Уровни р. Волхов – г. Новгород, м БС					
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь
1961	500	376	314	326	286	274	20	18.76	18.14	18.26	17.86	17.74
1962	580	475	482	412	428	404	20.8	19.75	19.82	19.12	19.28	19.04
1963	417	298	250	246	234	262	19.17	17.98	17.5	17.46	17.34	17.62
1966	674	514	369	284	269	282	21.74	20.14	18.69	17.84	17.69	17.82
1967	444	354	279	244	237	273	19.44	18.54	17.79	17.44	17.37	17.73
1968	567	421	358	280	254	273	20.67	19.21	18.58	17.8	17.54	17.73
1969	487	370	281	244	226	232	19.87	18.7	17.81	17.44	17.26	17.32
197	369	314	266	229	217	260	18.69	18.14	17.66	17.29	17.17	17.6

1												
197												
2	337	291	259	222	218	236	18.37	17.91	17.59	17.22	17.18	17.36
197												
3	369	297	272	261	264	264	18.69	17.97	17.72	17.61	17.64	17.64
197												
5	447	333	244	242	230	218	19.47	18.33	17.44	17.42	17.3	17.18
197												
6	480	496	392	298	260	249	19.8	19.96	18.92	17.98	17.6	17.49
197												
7	452	343	296	290	296	316	19.52	18.43	17.96	17.9	17.96	18.16
197												
9	496	357	262	237	198	207	19.96	18.57	17.62	17.37	16.98	17.07
198												
0	444	320	254	252	261	258	19.44	18.2	17.54	17.52	17.61	17.58

Продолжение таблицы 3.1

Год	Уровни р. Волхов – г. Новгород, см						Уровни р. Волхов – г. Новгород, м БС					
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябр	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь

						б						
198												
1	493	366	258	213	243	347	19.93	18.66	17.58	17.13	17.43	18.47
198												
2	533	416	312	247	238	244	20.33	19.16	18.12	17.47	17.38	17.44
198												
3	460	346	254	203	185	235	19.6	18.46	17.54	17.03	16.85	17.35
...
200												
8	425	325	256	236	280	313	19.25	18.25	17.56	17.36	17.8	18.13
200												
9	493	458	398	346	292	437	19.93	19.58	18.98	18.46	17.92	19.37
201												
0	559	464	331	272	230	233	20.59	19.64	18.31	17.72	17.3	17.33
201												
1	588	454	321	266	211	250	20.88	19.54	18.21	17.66	17.11	17.5
201												
2	498	411	323	267	235	268	19.98	19.11	18.23	17.67	17.35	17.68
201												
578	451	351	274	225	225	225	20.78	19.51	18.51	17.74	17.25	17.25

3												
201												
4	331	293	248	230	185	183	18.31	17.93	17.48	17.3	16.85	16.83
201												
5	386	284	227	186	158	152	18.86	17.84	17.27	16.86	16.58	16.52
201												
6	401	307	328	332	289	268	19.01	18.07	18.28	18.32	17.89	17.68
201												
7	517	449	460	488	425	422	20.17	19.49	19.6	19.88	19.25	19.22

Продолжение таблицы 3.1

Год	Уровни р. Волхов – г. Новгород, см						Уровни р. Волхов – г. Новгород, м БС					
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь
201												
8	503	370	297	246	239	243	20.03	18.7	17.97	17.46	17.39	17.43
201												
9	342	277	254	319	302	391	18.42	17.77	17.54	18.19	18.02	18.91
202												
0	428	366	276	245	225	242	19.28	18.66	17.76	17.45	17.25	17.42

202												
1	477	375	308	261	253	254	19.77	18.75	18.08	17.61	17.53	17.54

Величины объемов и изменения объемов определялись по графику, представленному на рисунке 3.1, построенному по данным «Материалов по исследованию р. Волхов и его бассейна» [6]. Результаты представлены в таблице 3.2

По данным об изменении объемов рассчитывался приток в Волховское водохранилище. Результаты приведены в таблице 3.3.

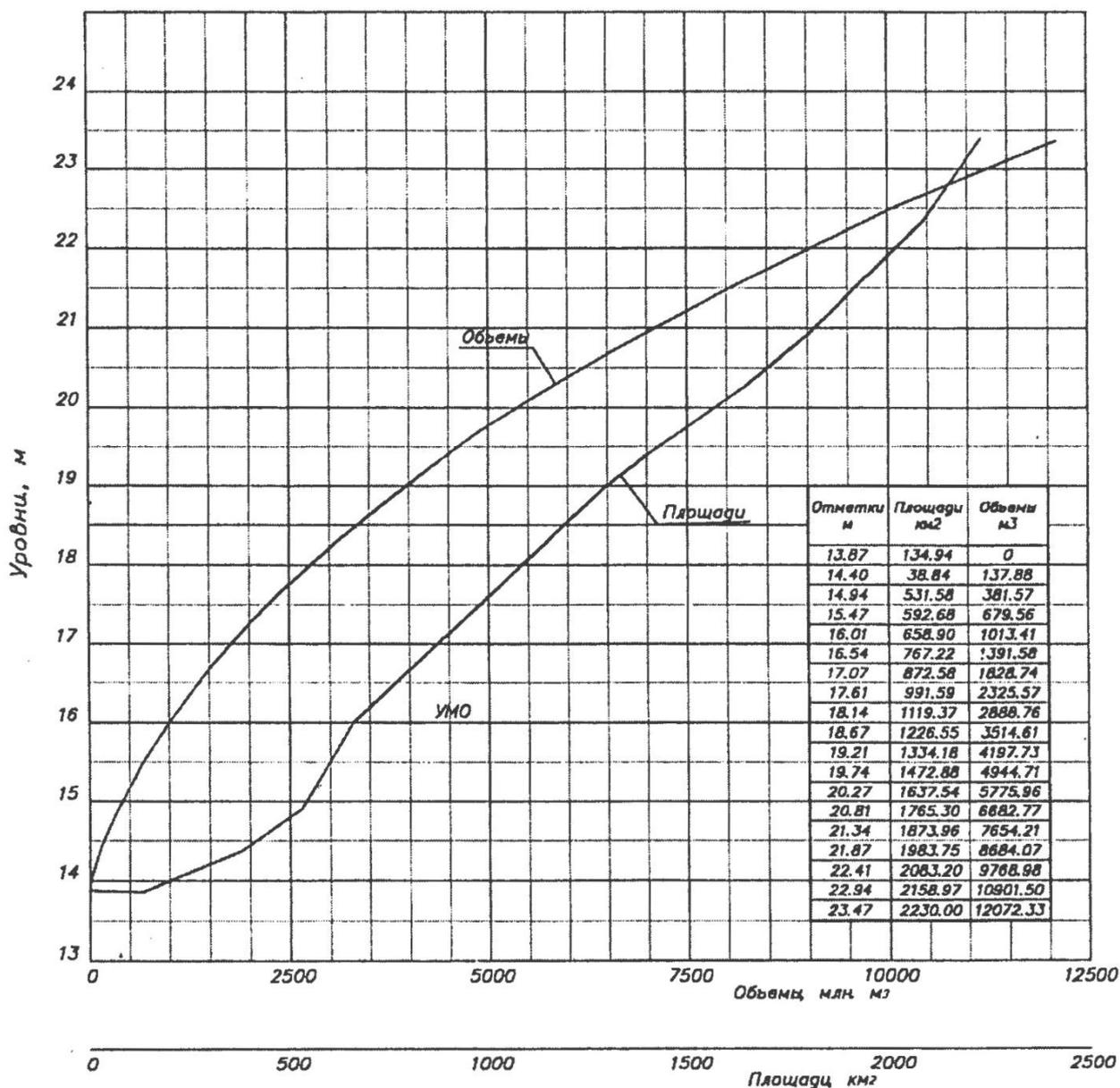


Рисунок 3.1 – График зависимости площади поверхности и емкости озера Ильмень от уровня воды

Таблица 3.2 – Объемы воды озера Ильмень

Год	Емкость оз. Ильмень, м ³						Разница объемов, млн м ³				
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	dV _{VI-VII}	dV _{VII-VIII}	dV _{VIII-IX}	dV _{IX-X}	dV _{X-XI}
1961	5350	3750	2850	3000	2600	2450	-1600	-900	150	-400	-150
1962	6800	5100	5100	4100	4350	4000	-1700	0	-1000	250	-350
1963	4200	2750	2250	2250	2100	2300	-1450	-500	0	-150	200
1966	8250	5500	3600	2550	2400	2550	-2750	-1900	-1050	-150	150
1967	4500	3400	2550	2250	2150	2500	-1100	-850	-300	-100	350
1968	6600	4200	3500	2550	2250	2500	-2400	-700	-950	-300	250
1969	5250	3500	2550	2250	2050	2050	-1750	-950	-300	-200	0
1971	3600	2850	2400	2050	1900	2300	-750	-450	-350	-150	400
1972	3250	2650	2350	1850	1900	2200	-600	-300	-500	50	300
1973	3600	2750	2400	2300	2350	2350	-850	-350	-100	50	0
1975	4600	3100	2200	2200	2050	1950	-1500	-900	0	-150	-100
1976	5200	5300	3900	2750	2350	2250	100	-1400	-1150	-400	-100
1977	4600	3250	2750	2700	2700	2950	-1350	-500	-50	0	250
1979	5300	3500	2350	2200	1750	1750	-1800	-1150	-150	-450	0
1980	4600	2950	2250	2250	2300	2300	-1650	-700	0	50	0

Продолжение таблицы 3.2

Год	Емкость оз. Ильмень, м ³						Разница объемов, млн м ³				
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	dV _{VI-VII}	dV _{VII-VIII}	dV _{VIII-IX}	dV _{IX-X}	dV _{X-XI}
1981	5250	3650	2350	1800	2200	3400	-1600	-1300	-550	400	1200
1982	5800	4200	2850	2250	2200	2200	-1600	-1350	-600	-50	0
1983	4750	3350	2250	1750	1650	2100	-1400	-1100	-500	-100	450
...
2008	4250	3050	2280	2100	2530	2880	-1200	-770	-180	430	350
2009	5240	4720	3950	3350	2650	4420	-520	-770	-600	-700	1770
2010	6310	4800	3140	2430	2040	2070	-1510	-1660	-710	-390	30
2011	6810	4660	2990	2380	1860	2220	-2150	-1670	-610	-520	360
2012	5320	4090	3020	2390	2080	2400	-1230	-1070	-630	-310	320
2013	6630	4620	3430	2460	1990	1990	-2010	-1190	-970	-470	0
2014	3140	2660	2200	2040	1640	1630	-480	-460	-160	-400	-10
2015	3820	2570	2010	1650	1420	1380	-1250	-560	-360	-230	-40
2016	3980	2810	3090	3150	2620	2400	-1170	280	60	-530	-220
2017	5620	4590	4750	5160	4250	4210	-1030	160	410	-910	-40
2018	5400	3650	2710	2190	2120	2160	-1750	-940	-520	-70	40

Продолжение таблицы 3.2

Год	Емкость оз. Ильмень, м ³	Разница объемов, млн м ³
-----	-------------------------------------	-------------------------------------

	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	dV_{VI-VII}	$dV_{VII-VIII}$	$dV_{VIII-IX}$	dV_{IX-X}	dV_{X-XI}
2019	3300	2500	2260	2960	2760	3880	-800	-240	700	-200	1120
2020	4300	3610	2490	2180	1990	2150	-690	-1120	-310	-190	160
2021	4990	3710	2830	2330	2250	2260	-1280	-880	-500	-80	10

Таблица 3.3 – Приток воды в Волховское водохранилище

Год	Расходы г. Волхов						Приток к вдхр., мм					
	июн ь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	июнь	июл ь	август	сентябрь	октябрь	ноябрь
1961	827	481	415	512	319	286	7.2	4.6	15.6	11.9	8.7	19.8
1962	1091	965	817	823	732	736	14.7	31.9	14.4	30.3	19.8	38.0
1963	654	346	148	110	128	294	3.4	5.2	4.9	1.8	6.7	17.9
1966	1517	872	519	258	289	277	15.6	5.0	4.0	6.6	11.4	28.2
1967	770	519	244	165	195	427	11.6	6.5	4.3	4.2	10.8	23.8
1968	1099	726	468	219	236	424	6.2	15.2	3.5	3.5	10.9	27.8
1969	909	503	246	152	132	376	8.1	4.7	4.4	2.5	4.4	23.8
1971	532	532	288	135	104	241	8.2	11.9	5.1	2.6	8.5	14.6
1972	426	219	117	64	43	96	6.5	3.5	-2.4	2.7	5.2	8.5
1973	470	195	77	73	108	223	4.9	2.0	1.3	3.0	3.6	13.3
1975	730	369	138	98.1	82.1	73.1	5.3	0.9	4.6	1.4	1.5	11.6
1976	991	969	580	325	163	134	34.0	14.4	4.7	5.7	4.1	16.9
1977	766	464	356	328	448	594	8.4	9.0	11.1	10.8	17.9	29.2
1979	806	511	409	278	184	185	4.0	2.4	11.6	3.5	6.1	16.2
1980	702	425	343	407	393	380	2.5	5.3	11.3	14.1	13.0	21.4
1981	883	522	272	190	456	814	9.1	0.9	2.1	11.3	30.1	38.0

Продолжение таблицы 3.3

Год	Расходы г. Волхов						Приток к вдхр., мм					
	июн ь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	июнь	июл ь	август	сентябрь	октябрь	ноябрь
1982	1006	667	413	290	327	504	13.1	5.1	6.1	8.9	10.8	29.3
1983	764	488	301	164	186	258	7.7	2.3	3.7	4.2	11.8	18.1
...	
2008	589	407	294	319	416	502	4.4	3.8	7.4	15.9	18.1	24.0
2009	873	750	612	541	660	954	22.3	15.1	12.7	9.1	44.0	42.5
2010	1077	714	366	288	234	368	16.6	2.8	3.2	4.6	8.1	25.7
2011	1092	707	466	346	383	373	9.1	2.4	7.7	4.9	17.2	26.0
2012	843	588	367	304	441	724	12.4	6.0	4.2	6.2	18.6	34.5
2013	1120	673	490	234	186	447	11.7	7.3	4.0	1.8	6.1	28.8
2014	434	250	189	166	126	186	8.3	2.5	4.2	0.5	4.0	11.6
2015	520	294	195	130	99	121	1.5	2.7	1.9	1.4	2.8	10.5
2016	569	467	630	479	424	445	4.1	18.9	21.6	9.2	11.3	21.8
2017	930	842	1002	938	889	891	17.8	29.8	38.2	19.5	28.9	41.1
2018	802	480	286	156	150	209	4.5	4.1	2.9	4.3	5.5	17.0
2019	415	265	318	417	577	1340	3.7	5.7	19.3	11.3	33.1	49.5

Продолжение таблицы 3.3

Год	Расходы г. Волхов						Приток к вдхр., м ³ /с					
	июн ь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	июнь	июл ь	август	сентябрь	октябрь	ноябрь
2020	658	415	284	210	155	305	13.1	-0.4	5.5	4.5	7.1	18.3
2021	776	523	390	280	281	558	9.6	6.2	6.6	8.3	9.4	28.1

Прогноз притока в водохранилище

Приток содержит в себе сток с бассейна, осадки и испарение с поверхности водосбора. В условиях северо-запада испарение компенсируется осадками. Бассейн водохранилища можно с известным приближением отождествить с бассейном реки.

Если данные по стоку имеются лишь в замыкающем створе, то для расчета притока используют метод Р. А. Нежиховского [7].

По имеющимся данным о расходах за весь период с июля по сентябрь, когда выпало очень мало осадков, строился график связи среднемесячных расходов смежных месяцев, представленный на рисунке 3.2. В таких случаях сток реки во второй половине месяца будет почти целиком обусловлен расходом озерных, русловых и грунтовых запасов воды в бассейне. Если по этим данным построить зависимость среднемесячных расходов предыдущего (Q_i) и последующего месяца (Q_{i+1}), то с помощью ее можно найти Q_{i+1} по Q_i .

Эти расходы можно рассматривать как гарантированные; запишем эту зависимость:

$$Q_{\text{гар } i+1} = f(Q_i). \quad (3.6)$$

По кривой $Q_{\text{гар } i+1} = f(Q_i)$ может быть построена так называемая кривая истощения. Для этого нужно по Q_i определить Q_{i+1} , по $Q_{i+1} - Q_{i+2}$ и т.д. Построенная таким образом кривая характеризует собой истощение озерных, русловых и грунтовых запасов воды; будем ее называть суммарной кривой истощения (рисунок 3.3) [8].

Пользуясь суммарной кривой истощения, была построена кривая объемов, в предположении, что величина грунтового питания устойчива:

$$ZQ = f(Q), \quad (3.7)$$

где ZQ – объем, выраженный через сумму среднемесячных расходов воды.

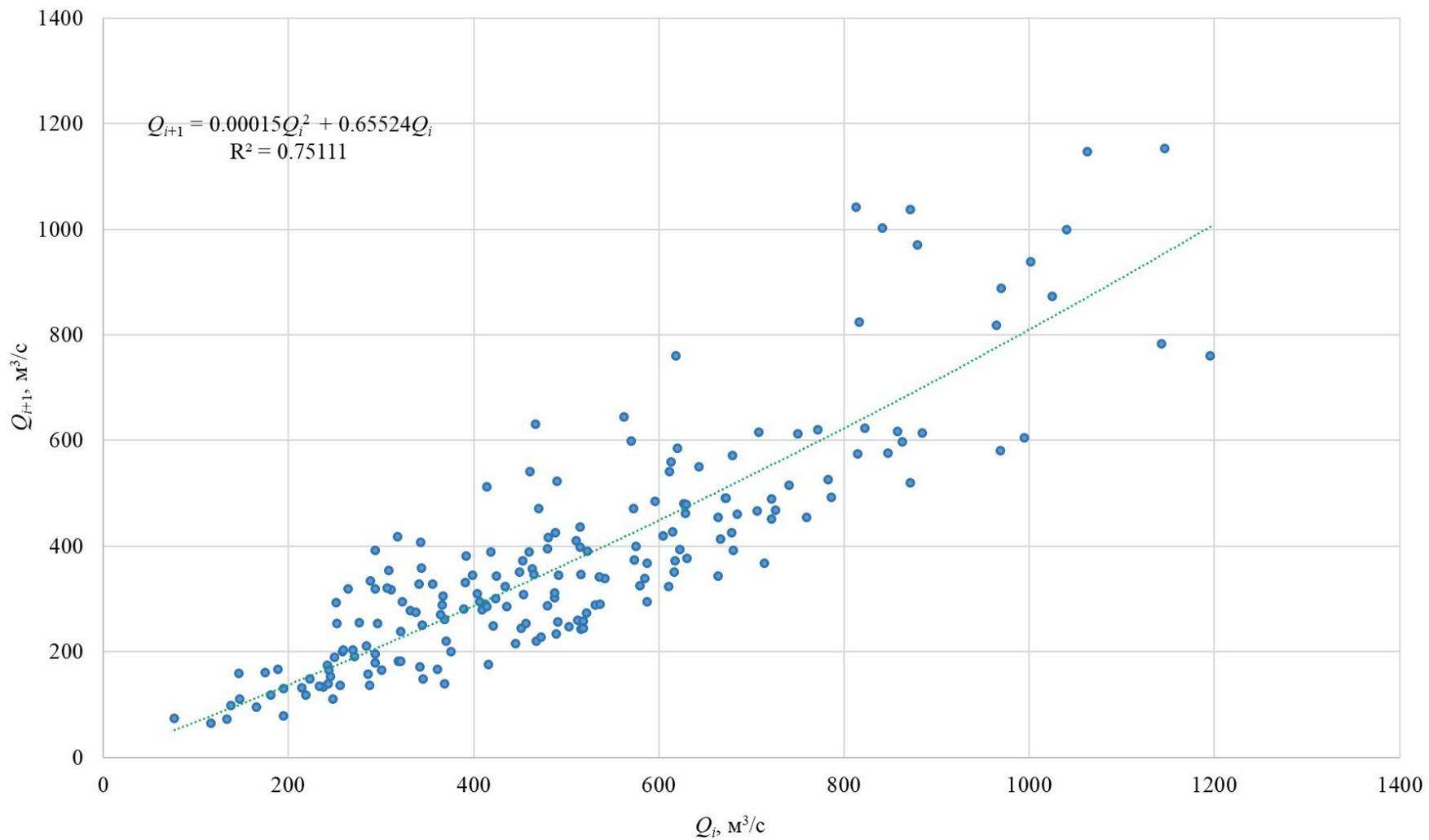


Рисунок 3.2 – Зависимость стока реки за данный месяц от стока за предыдущий месяц

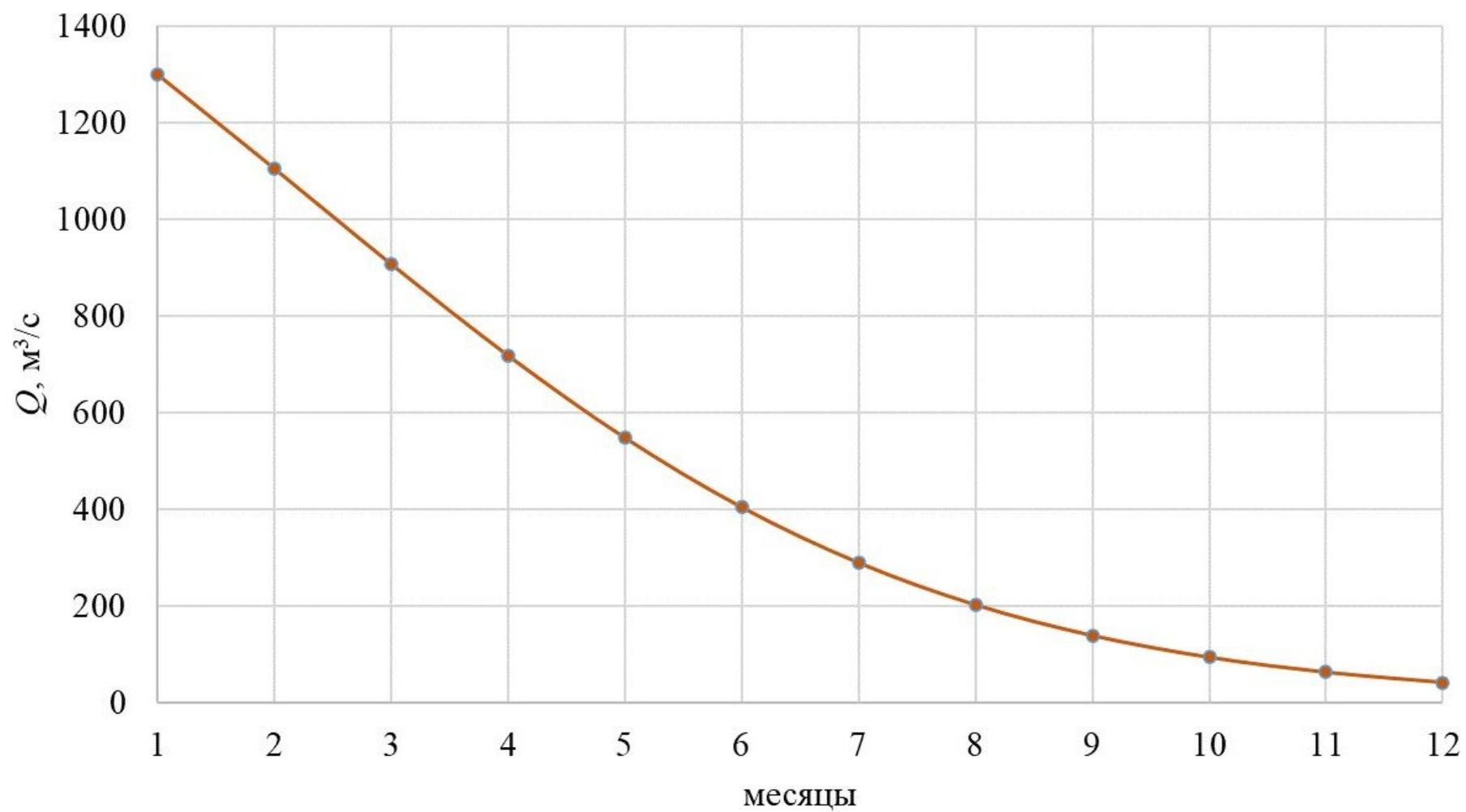


Рисунок 3.3 – Кривая истощения

Кривая объемов представлена на рисунке 3.4. Данная кривая объемов выражает соотношение между стоком реки в замыкающем створе и объеме воды в речной и озерной сети бассейна за вычетом того объема воды, при котором устанавливается равновесие между грунтовым притоком в реки и озера и оттоком из них. Из этого следует важный вывод: приток в речную и озерную сеть, определенный с помощью указанной кривой объемов, будет представлять собой приток воды за вычетом грунтового, этот приток будем называть для краткости просто притоком.

Используя гарантийную кривую и кривую объемов, методом конечных разностей строился график номограмма

$$Q_i = f(Q_i, h_{i+1}), \quad (3.8)$$

где Q_i и Q_{i+1} – среднемесячный расходы, соответственно за данный и следующий месяцы;

h – приток в следующий месяц, выраженный в мм слоя.

Пусть в $(i + 1)$ месяце имел место приток воды в речную и озерную сеть бассейна. Если из величины Q_{i+1} вычесть $Q_{\text{гар } i+1}$, то получим приток воды в речную и озерную сеть бассейна в $(i + 1)$ месяце (ΔZQ_{i+1}), выраженный через величину среднемесячного расхода:

$$\Delta ZQ_{i+1} = \Delta ZQ(Q_{i+1}) - \Delta ZQ(Q_{\text{гар } i+1}). \quad (3.9)$$

Выражая приток в речную и озерную сеть бассейна в миллиметрах слоя (h), для месяца со средним числом дней (30.5) получим:

$$h_{i+1} = 2640/F[ZQ(Q_{i+1}) - ZQ(Q_{\text{гар } i+1})]. \quad (3.10)$$

Зная Q_i , h_{i+1} и определяя по кривой $Q_{\text{гар } i+1}$ можно определить интересующую нас величину Q_{i+1} .

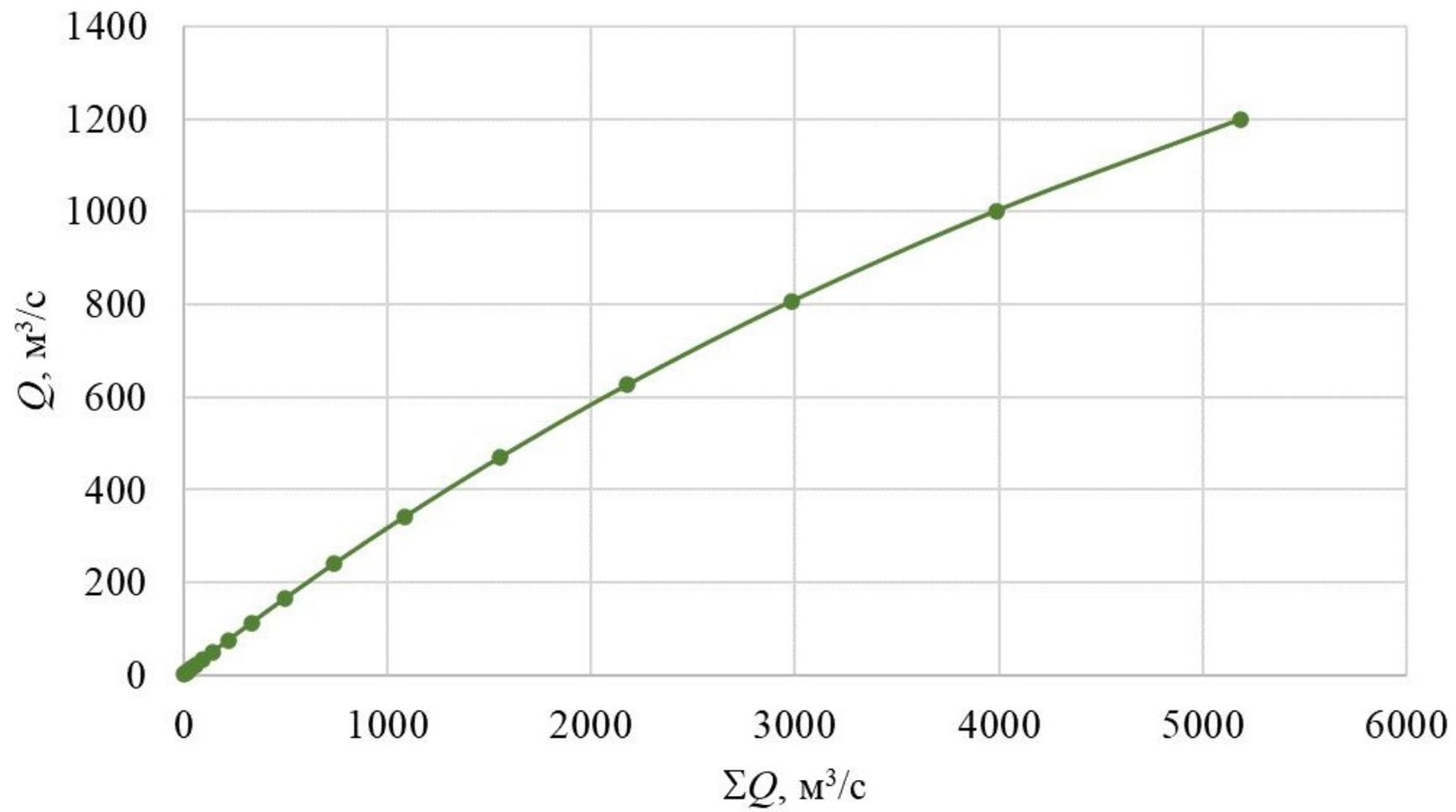


Рисунок 3.4 – Кривая объемов

Расчеты производятся в следующем порядке. В начале задаемся (обычно тремя – пятью) значениями Q_i , для которых определяем $Q_{\text{гар } i+1}$. Для $Q_{\text{гар } i+1}$ определяем объемы. Затем задаемся рядом значений h_{i+1} и выражаем их через расходы воды.

Нанеся данные на координатное поле и проводя изолинии h_{i+1} , получим график $Q_i = f(Q_i, h_{i+1})$.

По данной методике были построены номограммы для определения стока в июле, августе (рисунок 3.5), сентябре, октябре (рисунок 3.6). Исходные данные для построения номограмм представлены в приложении В.

Для того чтобы график $Q_i = f(Q_i, h_{i+1})$ использовать для прогнозов стока, нужно знать h_{i+1} , т. е. знать величину притока воды в речную и озерную сеть бассейна в месяце, для которого дается прогноз стока.

Для прогноза величины притока в летне-осенние месяцы будут зависимости между его величиной и осадками, его вызвавшими.

Перейдем теперь к непосредственному установлению зависимостей, служащих для предсказания величины h .

Если возьмем величины h , например, за сентябрь, то колебания их, вызванные колебанием грунтового притока, будут небольшими по сравнению с колебаниями, которые обусловлены непостоянством количества выпадающих осадков. Ввиду сказанного представляется возможным для каждого месяца в отдельности строить зависимости между средними месячными суммами осадков в бассейне (X) и месячным притоком в речную и озерную сеть бассейна (h).

При построении зависимостей $h = f(X)$ выяснилось, что они получаются более тесными, если для h за данный месяц брать X за месяц, смещенный на некоторый период времени назад.

Перейдем теперь к непосредственному установлению зависимостей, служащих для предсказания величины h .

Если возьмем величины h , например, за сентябрь, то колебания их, вызванные колебанием грунтового притока, будут небольшими по сравнению с

колебаниями, которые обусловлены непостоянством количества выпадающих осадков. Ввиду сказанного представляется возможным для каждого месяца в отдельности строить зависимости между средними месячными суммами осадков в бассейне (X) и месячным притоком в речную и озерную сеть бассейна (h).

При построении зависимостей $h = f(X)$ выяснилось, что они получаются более тесными, если для h за данный месяц брать X за месяц, смещенный на некоторый период времени назад.

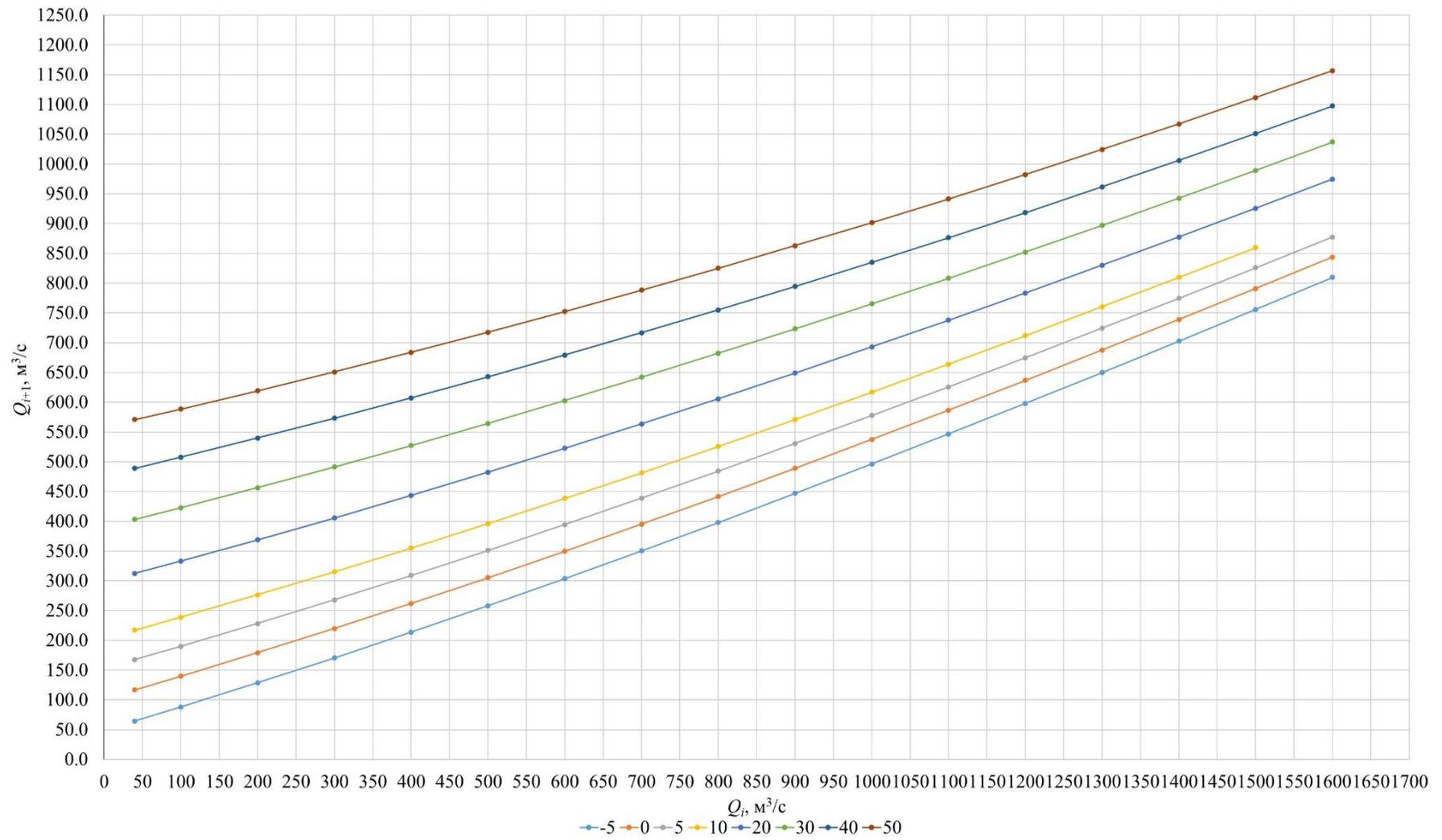


Рисунок 3.5 – Зависимость $Q_{i+1} = f(Q_i, h_i)$ для июля, августа

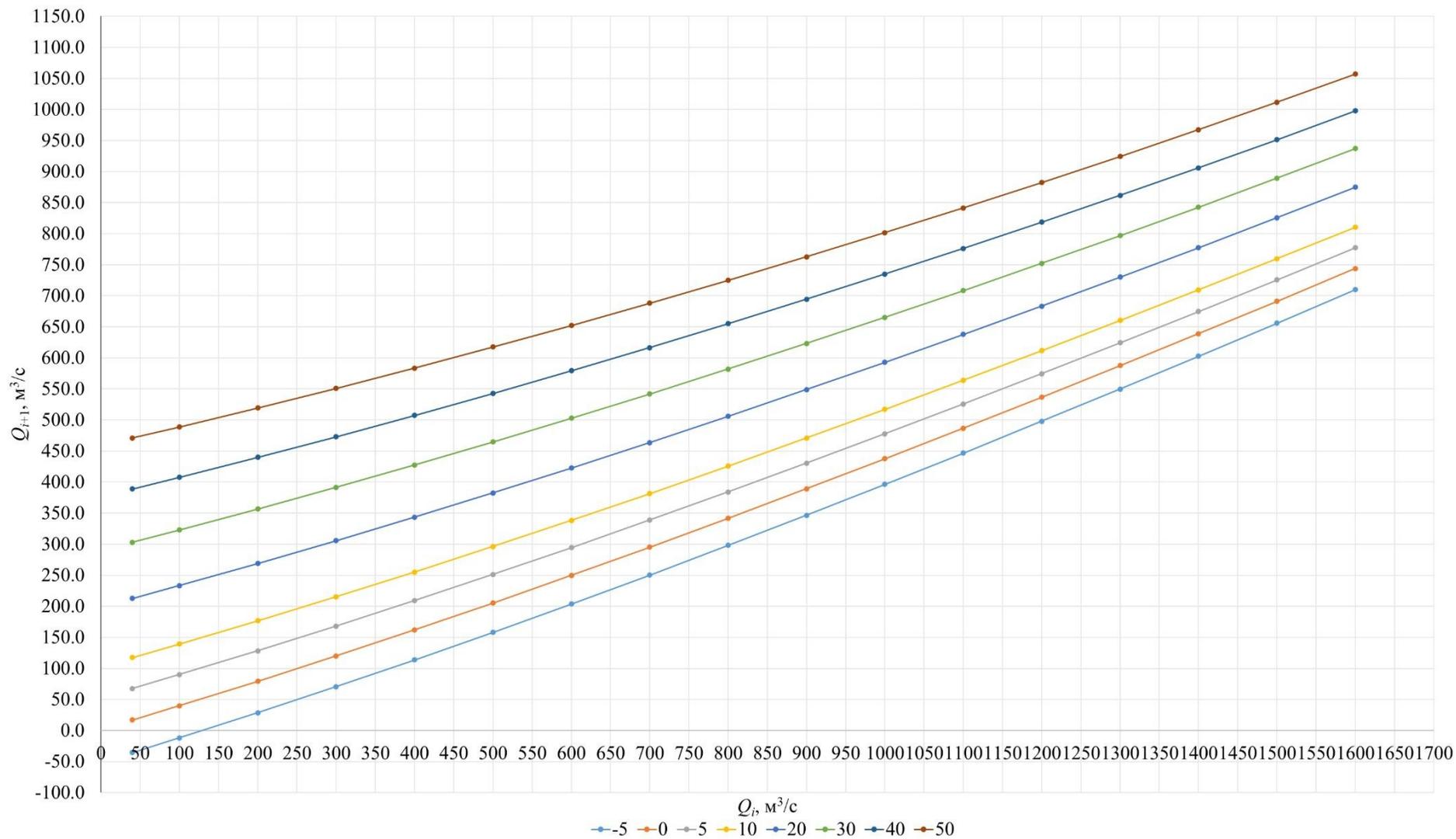


Рисунок 3.6 – Зависимость $Q_{i+1} = f(Q_i, h_i)$ для сентября, октября

Причина этого заключается в следующем. Величина h представляет собой склоновый и внутриводный приток в речную и озерную сеть. Есть и другая, более важная причина. Дело в том, что расходы воды в замыкающем створе, по которому, в основном, определяется объем воды в речной и озерной сети бассейна, реагирует на колебание воды в крупной речной и озерной сети и почти не реагирует на колебание в мелкой сети. В большом бассейне расход воды в замыкающем створе, по-видимому, не реагирует также на колебания объема воды в очень удаленной, хотя и крупной озерной и речной сети. В связи с этим, чем дальше отстоит метеостанция от замыкающего створа, тем более должен быть сдвинут тот месячный интервал времени, за который для нее нужно суммировать осадки. Однако, подсчитать таким образом осадки чрезвычайно трудно, и при прогнозах месячных величин притока в речную и озерную сеть можно пойти на ряд упрощений, целиком оправданных ориентировочным характером долгосрочных прогнозов осадков.

Установлено, что среднее время пробега составляет 12 дней [8]. Т.е. зависимости получают более тесными, если связать приток в речную и озерную сеть за следующий месяц с осадками за период с 19-го числа данного месяца по 18-ое число следующего месяца. Так, как и после этого работа по подсчету осадков остается трудоемкой, то подсчет осадков можно вести по декадным данным. Так, можно брать сумму осадков за третью декаду предыдущего месяца и две первые декады данного месяца.

Конечно, упрощения подсчета осадков, ухудшают зависимости $h = f(X)$. Поэтому следует придерживаться такого выработавшегося на практике порядка работы. В начале для всех лет подсчитываются осадки по декадным данным, затем строятся зависимости $h = f(X)$. Для отскочивших точек подсчитываются осадки точнее. После этого точки наносятся на графики зависимостей $h = f(X)$ по уточненным осадкам и окончательно прочерчиваются средние и огибающие линии.

Вполне понятно, что лучше для каждого бассейна устанавливать зависимости $h = f(X)$ по данным этого же бассейна. Этим самым будут учтены особенности бассейна – климат, озерность, заболоченность, лесистость и т.д.

Для этой цели на водосборе р. Волхов были выбраны метеостанции, по которым в открытых источниках есть сведения о суточных осадках.

На рисунке 3.7 представлено расположение действующих гидрологических постов и метеорологических станций.

Для выбора стокоформирующих осадков проводился корреляционный анализ между стоком и осадками по нескольким выбранным метеостанциям. В таблице 3.4 представлены коэффициенты корреляции с осадками, сдвинутыми на различную величину. Перечень действующих пунктов наблюдений за гидрологическим режимом водосборного бассейна оз. Ильмень и р. Волхов приведен в таблице 3.5. К сожалению, в открытом доступе по многим метеостанциям отсутствуют данные сведения о суточном количестве осадков, поэтому в рассмотрение брались данные по двум метеостанциям – Старая Русса и Тихвин, данные по которым взяты из Массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России [9].

Таблица 3.4 – Коэффициенты корреляции суммы месячных осадков и притока воды к водохранилищу

Величина сдвижки осадков, дни	месяц			
	июль	август	сентябрь	октябрь
По метеостанции Старая Русса				
0	0.61	0.54	0.52	0.36
1	0.62	0.56	0.53	0.40
2	0.63	0.59	0.47	0.52
3	0.65	0.59	0.48	0.55

4	0.73	0.60	0.48	0.59
5	0.74	0.56	0.44	0.51

Продолжение таблицы 3.4

Величина сдвижки осадков, дни	месяц			
	июль	август	сентябрь	октябрь
По метеостанции Тихвин				
6	0.77	0.60	0.45	0.48
7	0.77	0.62	0.45	0.50
8	0.76	0.64	0.40	0.52
9	0.68	0.66	0.33	0.60
10	0.74	0.68	0.33	0.58
11	0.74	0.69	0.35	0.55
12	0.75	0.68	0.36	0.62
13	0.70	0.71	0.39	0.60
14	0.68	0.71	0.46	0.76
15	0.73	0.65	0.49	0.72
	7	8	9	10
0	0.15	0.47	0.23	0.04
1	0.22	0.37	0.29	0.06
2	0.20	0.37	0.24	0.12
3	0.17	0.37	0.25	0.08
4	0.21	0.36	0.22	0.09
5	0.23	0.38	0.17	0.14
6	0.31	0.43	0.20	0.18
7	0.28	0.40	0.24	0.18
8	0.31	0.42	0.23	0.23
9	0.31	0.44	0.20	0.25
10	0.32	0.45	0.16	0.23
11	0.34	0.43	0.20	0.21
12	0.34	0.42	0.17	0.30
13	0.22	0.45	0.28	0.31

14	0.19	0.48	0.30	0.37
15	0.26	0.46	0.32	0.40

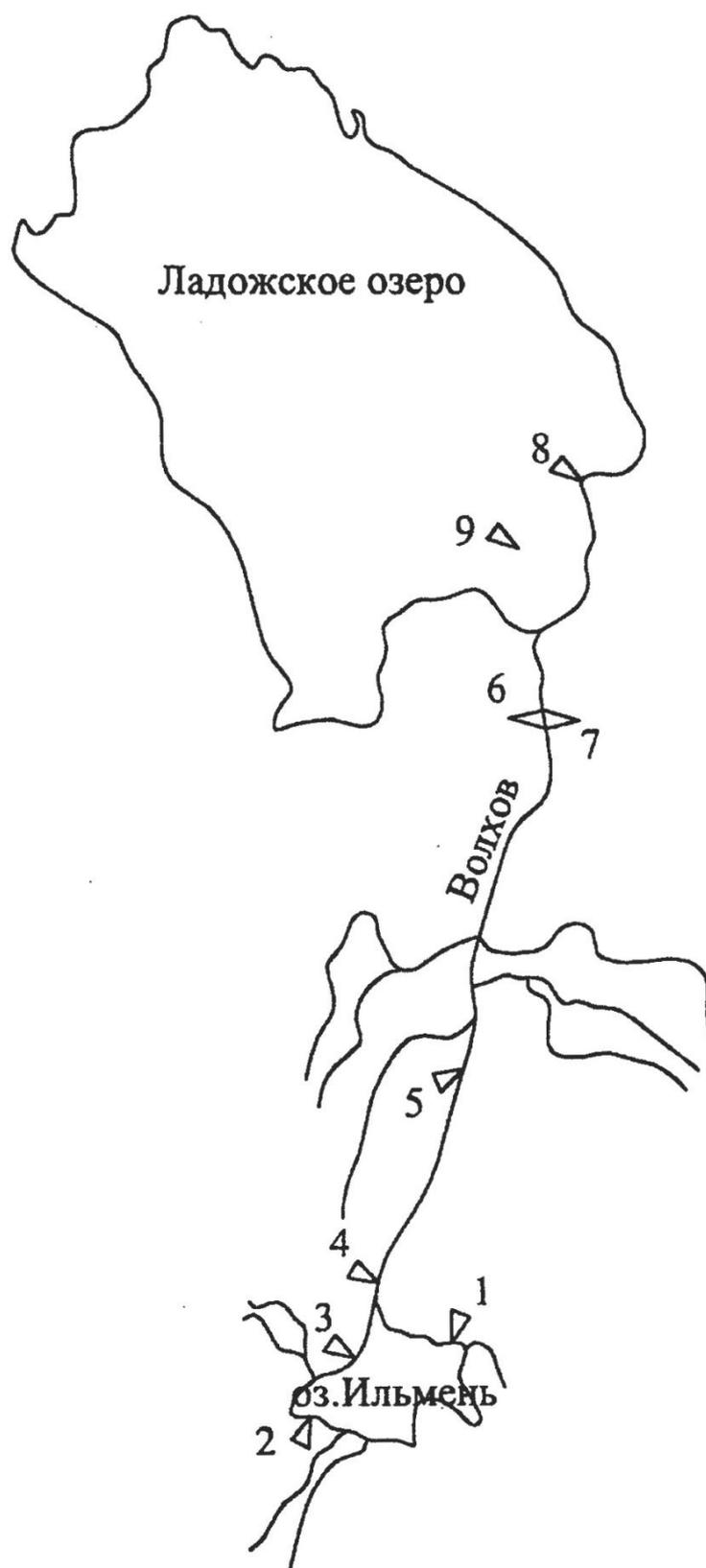


Рисунок 3.7 – Схема действующей гидрометеорологической сети на водосборе Волховского водохранилища

Таблица 3.5 – Перечень действующих пунктов наблюдений за гидрологическим режимом

№ п/п	Название водного объекта	Местоположение поста	В чем ведении находится	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Период действия		Высота нуля графика, м БС	Период, за который имеются данные наблюдений		
						открыт	закрыт		уровни	Расходы	Температура
1	оз. Ильмень	д. Войцы	СЗ УГМС	–	–	1944	Действ.	15.00	1931-42 1944-действ.	–	1945-действ.
2		с. Коростынь		–	–	1944		15.00	1944-действ.	–	1945-действ.
3		д. Козырево		–	–	1983		15.00	1983-действ.	–	1983-действ.
4	р. Волхов	г. Новгород		216	67500	1927 1944	1931 Действ.	15.00	1927-41 1944-действ.	–	1945-действ.
5		Волхово	141	70000	1927 1944	1941 Действ.	15.00	1927-41 1944-действ.	–	1945-действ.	
6		VI ГЭС № 6 Верхний бьеф	Лен- энерго	26.6	79800	1944	Действ.	15.00	–	1944- действ	–
7		VI ГЭС № 6 Нижний бьеф	Лен- энерго	26.6	79800	1944	Действ.	15.00	–	1944- действ	–

Продолжение таблицы 3.5

№ п/п	Название водного объекта	Местоположение поста	В чем ведении находится	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора , км ²	Период действия		Высота нуля графика, м БС	Период, за который имеются данные наблюдений		
						открыт	закрыт		уровни	Расходы	Температура
8	р. Волхов	г. Новая Ладога	УВБВП	1.2	80200	1919	Действ.	2.80	1944-действ.	1944- действ.	–
9	Ладожское озеро	д. Сторожно	СЗ УГМС	–	–	1945	Действ.	0.00	1946-действ.	–	1946-действ
10	Ладожское озеро	Маяк Сухо		–	–	1876	Действ.		1881-действ.	–	1945-действ.

Как видно из таблицы 3.4 наилучшая корреляция наблюдается с осадками по метеостанции Старая Русса. В таблице 3.6 приведены уравнения связи с суммой месячных осадков, имеющие наилучшие коэффициенты корреляции.

Таблица 3.6 – Зависимости для прогноза притока воды

Вид связи	Коэффициент корреляции, r
$H_{VII} = 0.53 * X_{\text{Тихвин}} 14.05-13.06 + 264.8$	0.07
$H_{VIII} = 1.86 * X_{\text{Тихвин}} 12.06-11.07 + 41.2$	0.34
$H_{IX} = 3.0 * X_{\text{Тихвин}} 15.07-14.08 - 14.5$	0.48
$H_X = 3.92 * X_{\text{Тихвин}} 16.08-15.09 + 90.3$	0.32
$H_{VII} = 4.11 * X_{\text{Ст.Русса}} 07.05-16.06 - 102.6$	0.77
$H_{VII} = 4.06 * X_{\text{Ст.Русса}} 14.06-13.07 - 89.1$	0.71
$H_{IX} = 1.91 * X_{\text{Ст.Русса}} 02.07-01.08 + 49.7$	0.53
$H_X = 9.11 * X_{\text{Ст.Русса}} 15.08-14.09 - 182.8$	0.76

Составление прогноза сводится к трем основным операциям:

- 1) предсказание притока в речную и озерную сеть в следующем месяце;
- 2) определение среднего расхода в данный месяц;
- 3) определение среднего расхода за следующий месяц по графическому номограмме.

С точки зрения современного представления о процессе формирования стока, вопрос о трансформировании притока в речную и озерную сеть в сток реки в замыкающем створе решается с помощью графика $Q_i = f(Q_i, h_{i+1})$.

С помощью этого метода можно давать прогнозы и на более длительный срок. В этом случае предсказанный средний расход за $i+1$ -й месяц служит исходным для предсказания среднего расхода за $i+2$ -й месяц.

В соответствии с описанной схемой составления прогноза по полученным зависимостям были последовательно выпущены прогнозы притока воды к водохранилищу и расходов.

В таблице 3.7 представлены сводные результаты поверочных прогнозов притока. Результаты прогноза по каждому месяцу и всем годам приведены в приложении Г, таблице Г.1.

Таблица 3.7 – Эффективность методики прогноза притока

Характеристика	Месяц			
	июль	август	сентябрь	октябрь
Процент оправдавшихся прогнозов	82	82	65	75
S/σ	0.65	0.72	0.86	0.66

Как видно из этой таблицы, методики прогноза притока по всем месяцам оказались эффективными, за исключением прогноза притока за сентябрь месяц.

На следующем этапе, по полученным прогнозным значениям притока выпускались прогнозы расходов воды. Результаты представлены в приложении Г, таблице Г.2. В таблице 3.8 приведены итоговые данные об эффективности методик. На рисунках 3.8 – 3.11 приведены спрогнозированные и фактические значения расходов воды.

Таблица 3.7 – Эффективность методики прогноза расхода

Характеристика	Месяц			
	июль	август	сентябрь	октябрь
Процент оправдавшихся прогнозов	89	93	79	79
S/σ	0.46	0.42	0.61	0.61

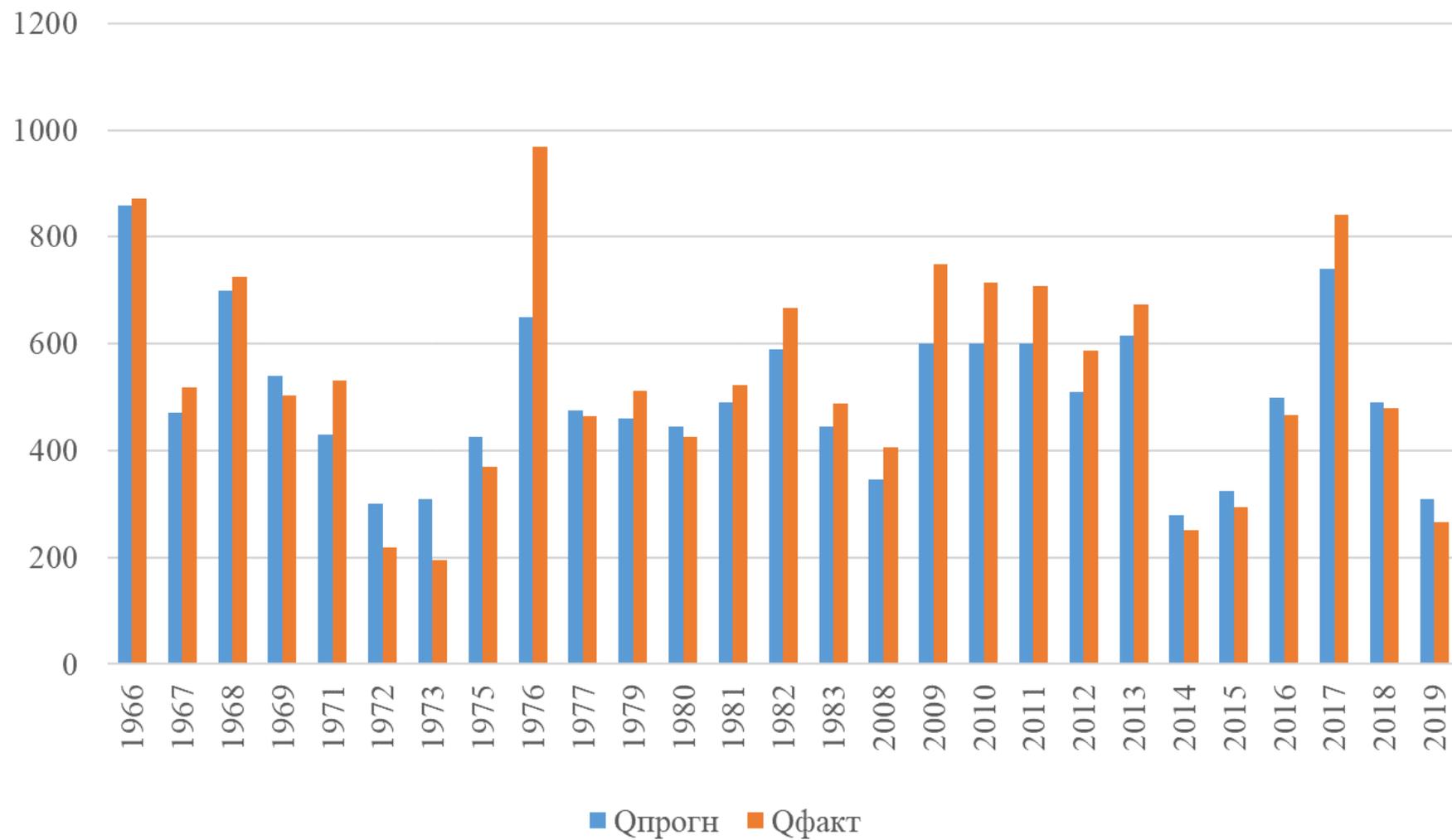


Рисунок 3.8 – Спрогнозированные и фактические расходы воды за июль

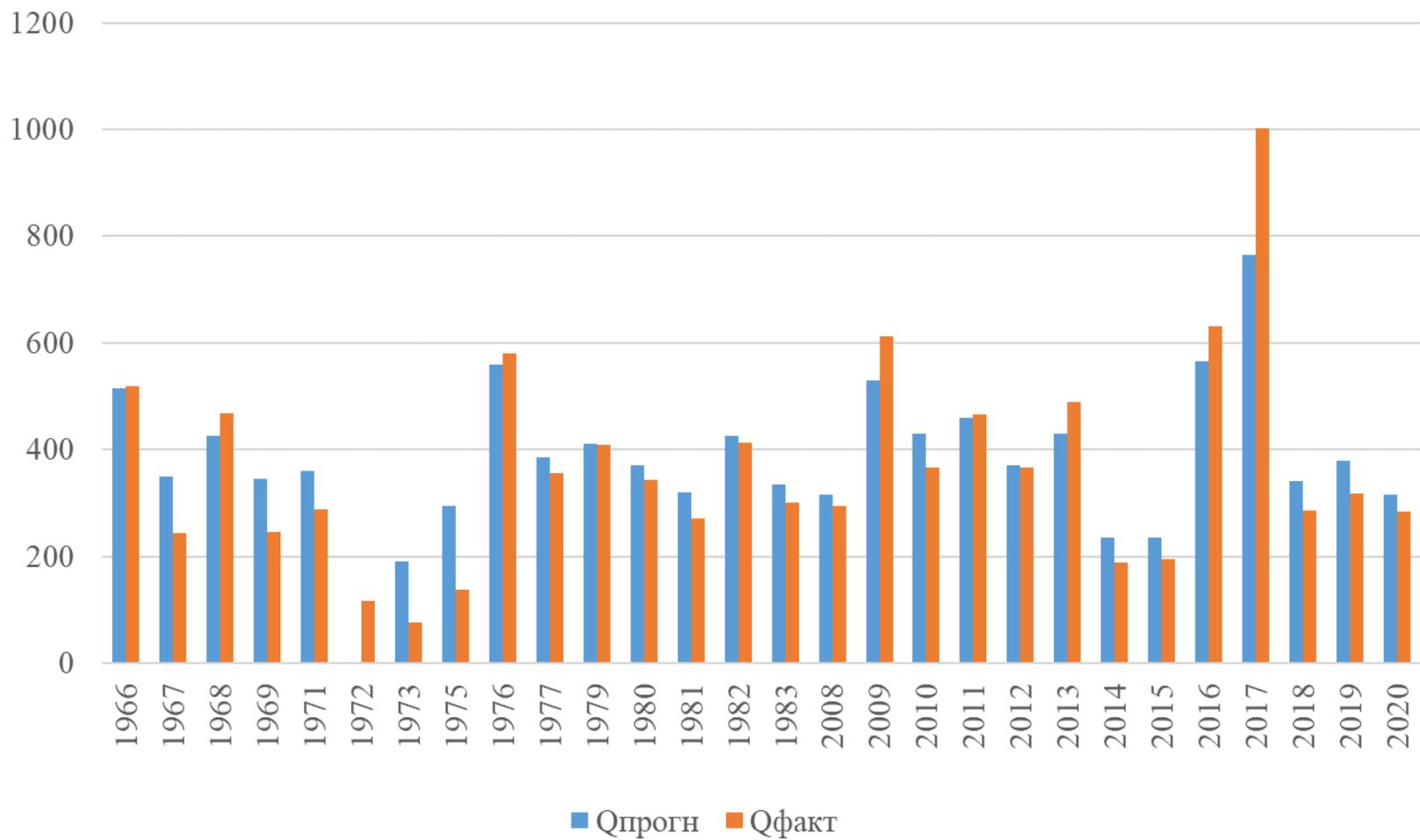


Рисунок 3.9 – Спрогнозированные и фактические расходы воды за август

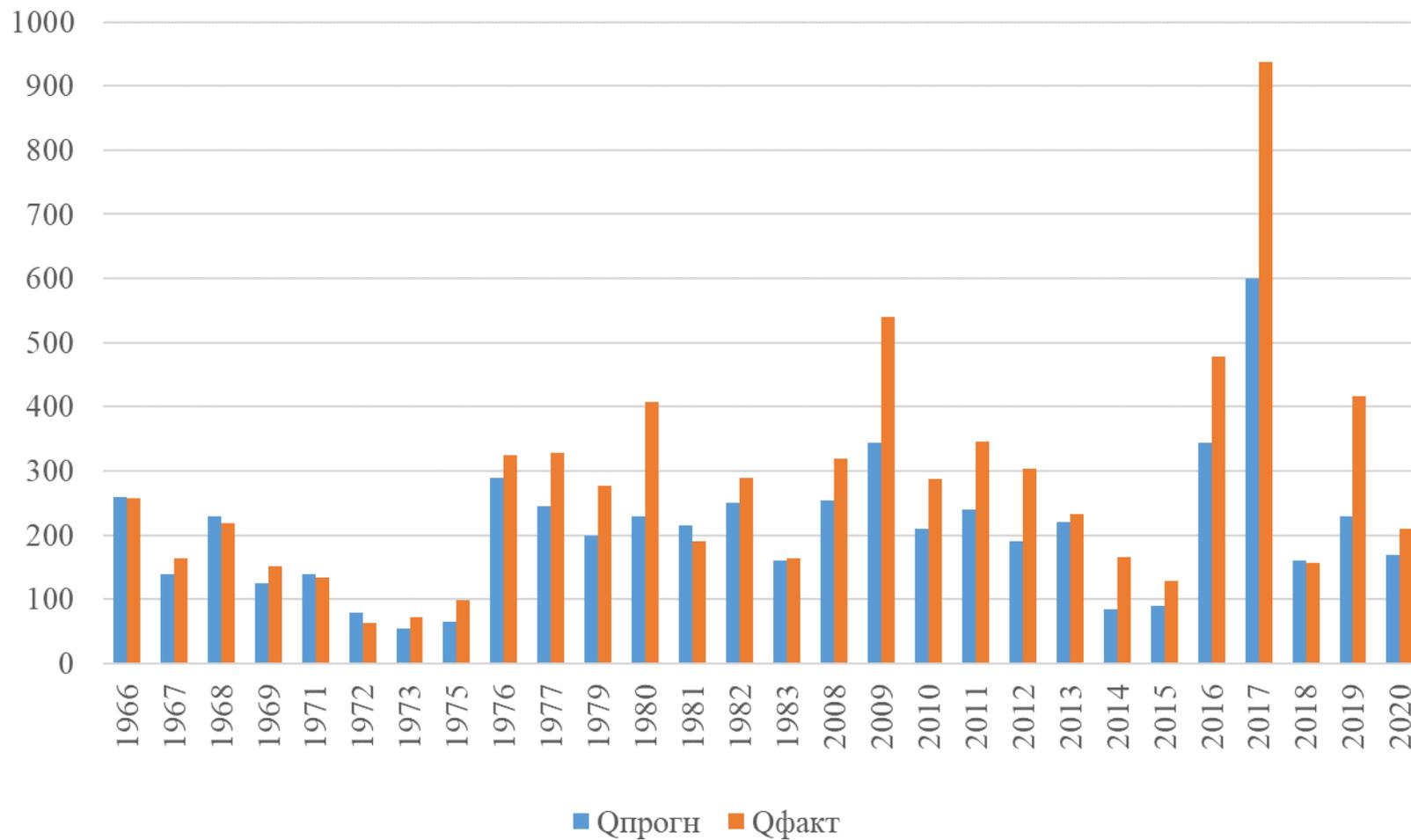


Рисунок 3.10 – Спрогнозированные и фактические расходы воды за сентябрь

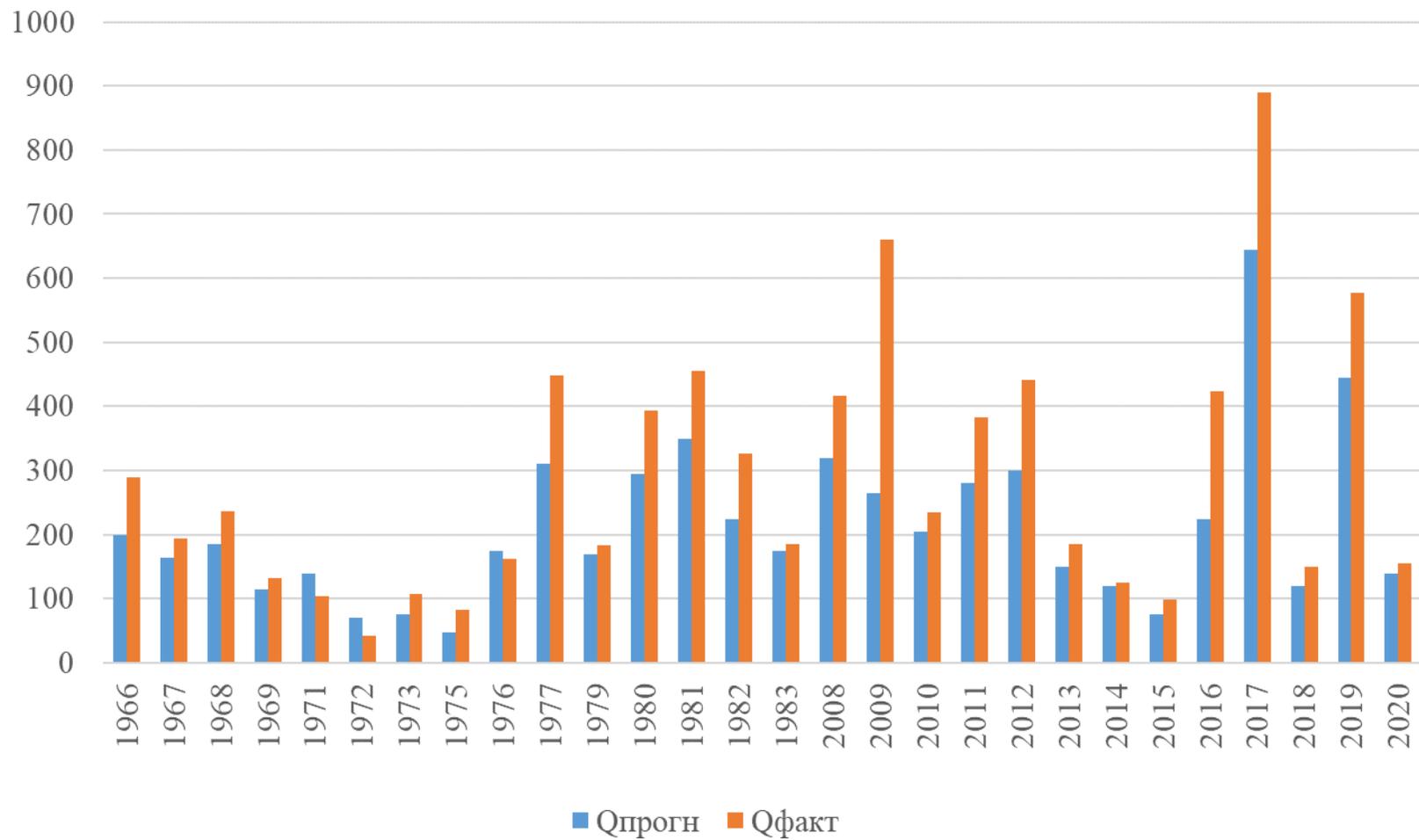


Рисунок 3.11 – Спрогнозированные и фактические расходы воды за октябрь

Заключение

Регулирование стока с помощью искусственных водохранилищ является эффективной мерой по рациональному использованию водных ресурсов. Комплексные водохозяйственные системы нуждаются в надежных долгосрочных прогнозах притока воды в водохранилища. Экономическая эффективность таких прогнозов зависит от их заблаговременности и точности. Для водохранилищ большое значение имеют не только прогнозы притока воды за период высоких вод, но и за период межени, который на многих крупных реках страны составляет от 5 до 7 месяцев.

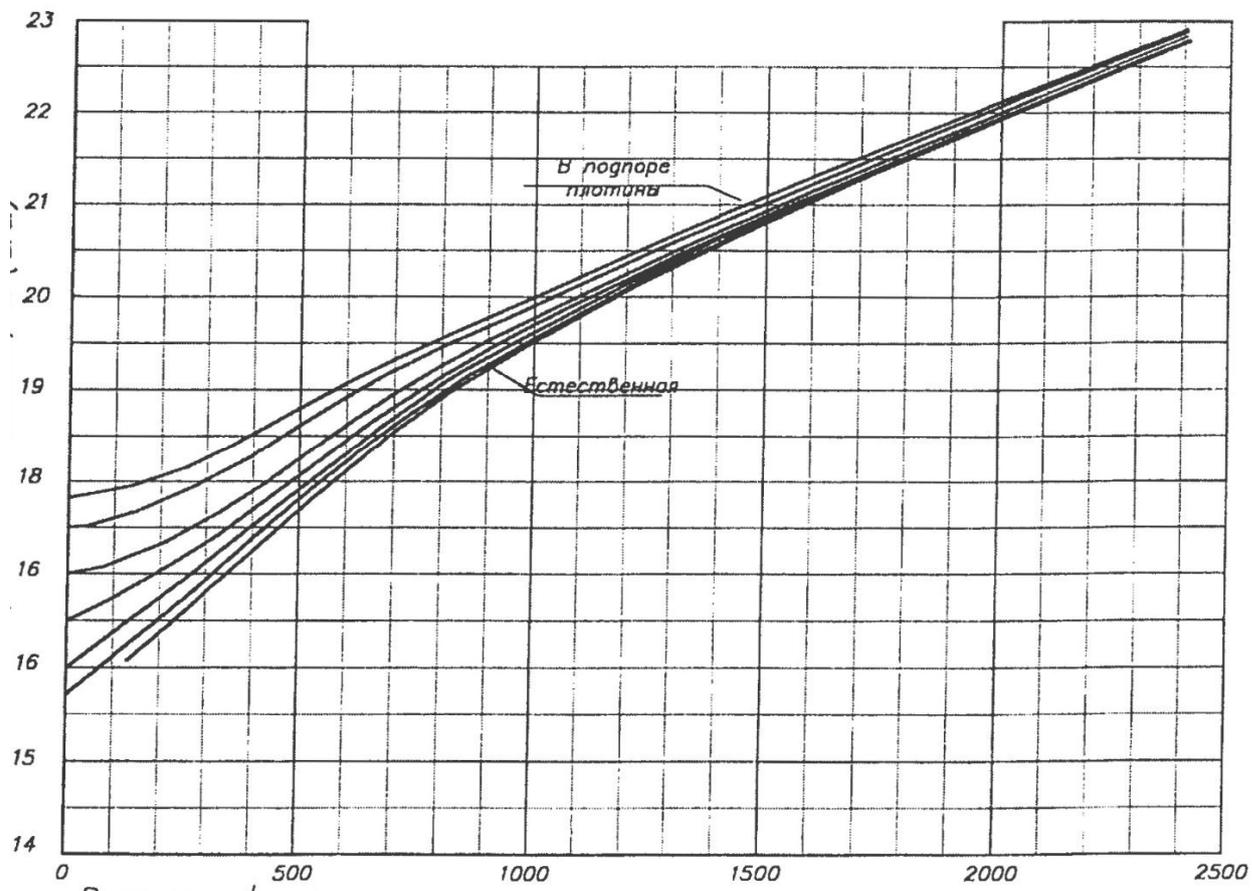
В настоящей работе рассматривалась методика прогноза притока воды в летне-осенний период с июля по октябрь. Используемый метод прогнозирования основан на учете зависимости между осадками и притоком в речную и озерную сеть бассейна и в определении тем или иным способом стока реки в замыкающем створе по величине притока, предшествующего стока и величине осадков. Данный метод применим как при наличии наблюдений за стоком, так и при их отсутствии. Методологические подходы были предложены еще в 50-ые годы прошлого века, однако в настоящее время продолжают широко использоваться в практике оперативных прогнозов управлений в связи с простотой и минимум исходной гидрометеорологической информации.

Проведенные расчеты, прогнозы и анализ полученных результатов свидетельствует об эффективности большинства прогностических зависимостей. Недостаточно высокая эффективность, особенно для сентября, вызвана скорее всего выбором метеостанции, по которой используются атмосферные осадки.

Список использованных источников

1. Нежиховский Р.А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ и озер. – Л.: Гидрометеиздат, 1061. – 294 с.
2. Вершинин А.П. Современные проблем экологии истока реки Волхов //Современные проблемы гидрометеорологии (сборник посвящен памяти профессора В.Н. Адаменко). – СПб: Астерион, 2006. – С. 122 – 138.
3. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима вод и водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат. 1989. – С. 327 – 344.
4. Гидрологические ежегодники. Том 1. Выпуск 0 – 3. – 1961 – 1983.
5. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505> (дата обращения 12.09.2023).
6. Материалы по исследованию р. Волхов и его бассейна. Выпуск XXIV. 1929 г.
7. Нежиховский Р.А. Опыт работы по прогнозам полезного притока в водохранилище северо-запада ЕТС // Метеорология и гидрология. № 6, 1952.
8. Нежиховский Р.А. Прогнозы месячного стока рек северо-запада ЕТС // Труды Центрального института прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1951. – С. 71 – 86.
9. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549. Электронный ресурс. Режим доступа – <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения – 02.10.2023).

Приложение А. Зависимость уровней нижнего бьефа Волховской ГЭС от
уровней Ладожского озера



Приложение Б. Многолетние характеристики годового стока р. Волхов в створе Волховской ГЭС

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1881	521	425	332	495	1760	1260	865	552	407	285	129	206	560
1882	210	186	370	1210	1060	823	518	294	183	120	50	53	372
1883	50	52	52	287	1200	876	566	461	534	589	753	455	568
1884	420	363	310	605	1430	1360	1040	641	419	294	193	111	537
1885	114	114	121	469	1299	956	589	332	228	410	638	358	502
1886	291	247	201	1020	1128	910	572	418	323	220	188	190	474
1887	290	225	205	511	1040	806	543	330	310	619	667	568	552
1888	502	425	300	1250	1340	910	648	450	306	270	238	440	564
1889	380	295	245	828	1500	937	584	390	279	262	322	165	481
1890	135	128	238	908	770	509	321	173	154	290	384	265	365
1891	220	195	190	564	1130	713	452	298	247	272	141	145	368
1892	166	150	140	412	1370	1080	851	728	559	422	445	280	561
1893	224	186	169	454	1478	1130	774	537	558	638	586	440	637
1894	393	342	315	1180	1360	1140	873	787	832	788	680	663	797

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1895	540	406	315	550	1500	988	762	548	481	501	472	252	556
1896	245	190	180	715	1290	983	648	481	501	472	459	252	521
1897	196	170	185	1120	1500	952	500	268	155	140	92	100	444
1898	150	180	169	659	1280	936	744	485	310	338	602	669	673
1899	695	747	615	1410	1960	1440	1130	627	434	427	540	382	768
1900	334	280	251	842	1900	1360	804	473	306	361	356	282	625
1901	326	256	229	939	1630	1120	745	436	242	158	79	75	477
1902	85.1	96.1	116	754	1640	1360	1100	1210	1240	1010	912	607	942
1903	466	380	622	1810	1620	1100	784	616	594	657	609	527	795
1904	509	403	307	661	1000	743	543	456	498	436	380	482	541
1905	520	416	353	900	1770	1270	807	542	474	845	848	679	794
1906	556	450	384	924	1210	766	428	252	240	196	224	371	458
1907	355	286	239	635	1260	877	538	409	255	197	106	96	383
1908	78.1	72.1	74.1	322	1100	943	777	507	1030	1330	836	616	712

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
------	--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----------------------

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1909	472	347	269	498	1460	1150	735	601	456	365	237	192	552
1910	247	234	448	1240	1160	773	502	373	496	491	366	395	598
1911	524	443	414	805	1980	1400	813	524	358	346	703	560	697
1912	232	223.9	414	1040	1370	1030	665	388	260	262	251	270	545
1913	379	286	338	1350	1310	862	862	569	218	197	382	414	629
1914	375	658	851	1470	1540	1090	636	365	220	183	78.1	150	513
1915	161	135	133	827	1800	1281	820	499	304	226	125	211	556
1916	202	183	188	1060	1460	999	697	452	506	665	858	806	752
1917	550	509	460	1110	1350	977	765	532	505	554	405	243	577
1918	202	154	131	739	1300	873	626	425	308	299	120	118	441
1919	202	154	131	739	1300	873	626	425	308	299	120	118	434
1920	133	78	193	1160	1160	726	415	204	94	67	50	95	350
1921	85.1	52.1	95.1	1050	839	500	330	212	125	198	235	213	348
1922	174	156	148	1060	2330	1740	1150	863	524	427	490	331	806

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												Q _{ср.год.}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

1923	291	249	217	389	1320	1270	921	775	725	716	1190	1140	862
1924	798	613	485	1470	1930	1410	965	635	396	243	172	158	672
1925	163	236	287	906	987	748	590	424	388	629	486	486	555
1926	374	338	307	731	2293	1545	889	564	383	288	486	468	717
1927	358	278	321	899	1263	1158	863	596	484	298	454	503	638
1928	436	377	319	939	1202	1048	1025	872	1037	1110	1043	832	884
1929	595	495	405	472	1513	1221	815	574	373	295	288	316	557
1930	273	252	290	841	789	474	294	392	381	547	717	611	514
1931	473	356	287	635	1643	1118	681	391	331	324	445	310	548
1932	258	250	194	850	1512	1126	787	492	344	529	771	773	727
1933	565	509	465	1133	1135	887	629	461	540	639	521	388	605
1934	306	261	357	1412	1202	768	515	436	285	228	225	194	496
1935	162	189	334	1120	1255	888	573	471	471	663	724	511	667
1936	470	378	478	1181	1255	818	513	259	200	182	190	233	471

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1937	301	236	279	881	735	556	332	277	254	160	140	94	334

1938	110	126	340	1166	998	653	416	175	160	151	112	143	364
1939	96	136	164	541	728	550	319	181	118	157	78	89	245
1940	58	65	60	335	568	336	223	147	159	280	424	462	312
1941	373	202	230	408	1430	1079	679	424	300	200	170	100	423
1942	90	80	120	464	1060	810	722	450	350	300	200	230	443
1943	229	230	269	1265	1326	914	708	615	427	294	244	238	563
1944	230	255	239	566	1191	878	542	338	274	225	217	154	390
1945	110	96.1	85.1	702	923	642	404	309	353	785	704	485	517
1946	375	288	237	915	1807	1200	685	460	388	457	352	287	583
1947	187	144	115	803	1241	856	536	341	328	207	126	184	434
1948	173	210	206	961	999	608	369	260	202	282	443	541	457
1949	363	287	259	796	967	907	741	515	397	335	234	290	480
1950	242	182	153	844	989	770	722	489	424	527	514	583	594

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1951	514	417	330	1244	1146	767	516	242	173	146	134	137	411
1952	178	141	111	411	632	422	297	252	293	888	1113	691	550

1953	660	518	428	1428	1401	983	813	1041	999	1246	1008	824	932
1954	594	467	384	685	830	633	434	323	294	438	654	467	499
1955	455	407	366	467	1976	1714	1196	760	454	295	208	233	646
1956	180	144	125	337	1981	1400	848	576	399	315	311	359	638
1957	377	378	370	1042	1429	1068	772	619	759	1157	1057	642	827
1958	570	434	370	807	1802	1269	823	623	393	298	605	459	696
1959	415	441	413	1391	1592	975	631	376	200	151	237	223	515
1960	160	133	107	614	1018	689	457	253	252	308	276	678	529
1961	598	466	737	1225	1095	827	481	415	512	319	286	380	515
1962	266	265	207	1152	1566	1091	965	817	823	732	736	634	809
1963	511	389	291	611	988	654	346	148	110	128	294	291	342
1964	232	162	140	477	819	634	322	238	133	135	137	153	303

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1965	222	188	177	585	1267	898	618	371	220	166	192	146	415
1966	189	150	177	1173	2324	1517	872	519	258	289	277	230	667
1967	181	135	230	924	1031	770	519	244	165	195	427	397	455

1968	309	235	246	1474	1567	1099	726	468	219	236	424	317	593
1969	241	190	159	596	1296	909	503	246	152	132	376	450	459
1970	342	271	235	885	1355	829	446	215	131	183	337	290	462
1971	290	318	262	1146	938	532	532	288	135	104	241	287	367
1972	222	164	144	689	661	426	219	117	64	43	96	279	255
1973	167	137	160	242	648	470	195	77	73	108	223	238	260
1974	310	281	260	707	878	712	620	585	338	151	424	385	567
1975	658	639	706	1392	1130	730	369	138	98.1	82.1	73.1	107	380
1976	157	140	140	696	1188	991	969	580	325	163	134	241	497
1977	259	218	205	922	1163	766	464	356	328	448	594	372	524
1978	339	256	276	1217	1420	1052	627	480	395	495	715	598	679

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1979	498	351	301	829	1166	806	511	409	278	184	185	273	443
1980	265	222	186	531	928	702	425	343	407	393	380	494	506
1981	568	490	406	1074	1261	883	522	272	190	456	814	546	627
1982	532	486	486	1279	1316	1006	667	413	290	327	504	427	655

1983	575	544	512	1292	1097	764	488	301	164	186	258	438	528
1984	546	445	351	1036	1046	783	516	345	249	466	522	329	496
1985	267	197	190	645	1219	902	664	453	371	433	603	467	568
1986	406	339	319	1166	1482	1009	672	490	522	619	634	495	668
1987	380	311	240	604	1277	1219	1063	1147	1152	1084	625	513	834
1988	520	438	360	1114	1157	748	488	311	316	294	221	246	589
1989	306	652	1210	1261	990	608	399	344	358	327	495	397	672
1990	447	861	1575	1567	1015	635	419	388	777	1205	1247	998	870
1991	797	678	715	1528	1435	1261	1143	783	525	366	420	432	817
1992	570	604	737	1464	1493	1017	588	294	178	108	115	239	558

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1993	317	408	471	1252	1341	773	454	307	319	430	343	250	502
1994	208	152	200	1136	1534	1440	995	605	419	309	239	326	729
1995	336	395	1017	1388	1395	997	611	322	181	179	180	194	494
1996	181	158	146	380	665	393	234	134	72.2	118	186	367	316
1997	307	291	640	944	1125	72.2	118	473	227	194	486	419	592

1998	463	428	581	906	1135	836	880	970	888	749	651	480	735
1999	458	442	429	1508	1723	1156	664	342	170	121	102	150	566
2000	258	258	344	935	952	604	563	644	549	395	400	424	553
2001	398	329	442	1256	1093	724	491	256	136	152	329	275	524
2002	233	476	866	1230	912	547	361	166	95	87.8	99.2	103	324
2003	93	94	100	350	697	598	680	571	598	707	839	684	501
2004	625	532	617	1588	1289	985	885	614	559	479	608	646	785
2005	800	694	573	1002	1159	1080	858	617	350	150	169	195	637
2006	240	196	148	731	787	823	537	289	333	456	604	833	498

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2007	876	674	895	1026	803	587	365	269	202	174	208	269	529
2008	232	270	645	1195	941	589	407	294	319	416	502	607	535
2009	480	456	480	987	1059	873	750	612	541	660	954	895	729
2010	599	491	431	1438	1438	1077	714	366	288	234	368	384	652
2011	371	377	375	1090	1593	1092	707	466	346	383	373	646	651
2012	540	438	383	902	1263	843	588	367	304	441	724	496	607

2013	515	483	383	759	1389	1120	673	490	234	186	447	463	595
2014	618	465	547	600	579	434	250	189	166	126	186	158	360
2015	187	256	605	916	858	520	294	195	130	99	121	217	366
2016	207	279	407	775	828	569	467	630	479	424	445	558	506
2017	576	497	735	1224	1244	930	842	1002	938	889	891	777	879
2018	751	628	586	1119	1267	802	480	286	156	150	209	148	548
2019	137	186	429	1009	642	415	265	318	417	577	1340	1438	598
2020	1445	1149	1375	1127	882	658	415	284	210	155	305	319	694

Продолжение приложения Б

Годы	Месяцы												$Q_{\text{ср.год.}}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2021	293	270	350	926	997	776	523	390	280	281	558	420	505
2022	478	499	602	1047	1109	716	422	249	110	192	307	272	500
2023	382	495	625	1645	1290	709	452	244	138	112	355	315	563

Приложение В. Данные для построения номограмм

Таблица В.1 – Данные для номограммы $Q_{i+1} = f(Q_i, h_{i+1})$ для июля, августа

Q_i	Q_{i+1}							
	$h_{i+1} = -5$	$h_{i+1} = 0$	$h_{i+1} = 5$	$h_{i+1} = 10$	$h_{i+1} = 20$	$h_{i+1} = 30$	$h_{i+1} = 40$	$h_{i+1} = 50$
40	64.5	116.8	167.7	217.3	312.6	403.1	489.1	570.9
100	88.1	139.8	190.1	239.1	333.3	422.8	507.8	588.7
200	128.6	179.2	228.5	276.5	368.8	456.5	539.9	619.2
300	170.5	220.0	268.2	315.2	405.5	491.4	573.1	650.9
400	213.7	262.0	309.2	355.1	443.4	527.4	607.4	683.7
500	258.0	305.3	351.3	396.1	482.4	564.6	642.8	717.5
600	303.6	349.7	394.6	438.3	522.5	602.7	679.2	752.3
700	350.3	395.2	438.9	481.5	563.7	641.9	716.7	788.2
800	398.0	441.7	484.2	525.7	605.8	682.1	755.1	825.0
900	446.7	489.1	530.5	570.9	648.9	723.3	794.5	862.9
1000	496.3	537.5	577.7	617.0	692.8	765.4	834.9	901.7
1100	546.7	586.7	625.8	663.9	737.7	808.3	876.2	941.6
1200	598.0	636.8	674.7	711.7	783.4	852.2	918.5	982.4
1300	649.9	687.5	724.3	760.2	830.0	897.0	961.7	1024.4

Продолжение таблицы В.1

Q_i	Q_{i+1}							
	$h_{i+1} = -5$	$h_{i+1} = 0$	$h_{i+1} = 5$	$h_{i+1} = 10$	$h_{i+1} = 20$	$h_{i+1} = 30$	$h_{i+1} = 40$	$h_{i+1} = 50$
1400	702.5	739.0	774.6	809.6	877.4	942.7	1005.9	1067.4
1500	755.8	791.1	825.7	859.6	925.6	989.4	1051.2	1111.6
1600	809.7	844.0	877.5	910.5	974.7	1037.0	1097.7	1157.1

Таблица В.2 – Данные для номограммы $Q_{i+1} = f(Q_i, h_{i+1})$ для сентября, октября

Q_i	Q_{i+1}							
	$h_{i+1} = -5$	$h_{i+1} = 0$	$h_{i+1} = 5$	$h_{i+1} = 10$	$h_{i+1} = 20$	$h_{i+1} = 30$	$h_{i+1} = 40$	$h_{i+1} = 50$
40	-35.5	16.8	67.7	117.3	212.6	303.1	389.1	470.9
100	-11.9	39.8	90.1	139.1	233.3	322.8	407.8	488.7
200	28.6	79.2	128.5	176.5	268.8	356.5	439.9	519.2
300	70	120	168.2	215.2	305.5	391.4	473.1	550.9
400	113.7	162.0	209.2	255.1	343.4	427.4	507.4	583.7
500	158.0	205.3	251.3	296.1	382.4	464.6	542.8	617.5
600	203.6	249.7	294.6	338.3	422.5	502.7	579.2	652.3
700	250.3	295.2	338.9	381.5	463.7	541.9	616.7	688.2

Продолжение таблица В.2

Q_i	Q_{i+1}
-------	-----------

	$h_{i+1} = -5$	$h_{i+1} = 0$	$h_{i+1} = 5$	$h_{i+1} = 10$	$h_{i+1} = 20$	$h_{i+1} = 30$	$h_{i+1} = 40$	$h_{i+1} = 50$
800	298.0	341.7	384.2	425.7	505.8	582.1	655.1	725.0
900	346.7	389.1	430.5	470.9	548.9	623.3	694.5	762.9
1000	396.3	437.5	477.7	517.0	592.8	665.4	734.9	801.7
1100	446.7	486.7	525.8	563.9	637.7	708.3	776.2	841.6
1200	498.0	536.8	574.7	611.7	683.4	752.2	818.5	882.4
1300	549.9	587.5	624.3	660.2	730.0	797.0	861.7	924.4
1400	602.5	639.0	674.6	709.6	777.4	842.7	905.9	967.4
1500	655.8	691.1	725.7	759.6	825.6	889.4	951.2	1011.6
1600	709.7	744.0	777.5	810.5	874.7	937.0	997.7	1057.1

Приложение Г. Результаты поверочных прогнозов притока воды к водохранилищу

Таблица Г.1 – Результаты поверочных прогнозов притока к водохранилищу

Год	ИЮЛЬ					АВГУСТ				
	X , мм	h_{ϕ} , мм	$h_{пр}$, мм	δh^2	Δh^2	X , мм	h_{ϕ} , мм	$h_{пр}$, мм	δh^2	Δh^2
1966	72.3	5.0	6.4	2.2	3.3	95.7	4.0	9.9	34.9	12.1
1967	98.4	6.5	10.0	12.2	0.1	53.5	4.3	4.2	0.0	9.9
1968	119.1	15.2	12.8	5.8	70.8	87.6	3.5	8.8	27.6	15.2
1969	16.1	4.7	-1.2	34.7	4.4	47.7	4.4	3.4	0.8	9.5
1971	118.5	11.9	12.7	0.6	26.4	66.8	5.1	6.0	0.8	5.4
1972	35.3	3.5	1.4	4.3	11.0	12.0	-2.4	-1.3	1.2	97.0
1973	83	2.0	7.9	34.0	22.4	75.0	1.3	7.1	33.8	37.8
1975	50	0.9	3.4	6.3	34.7	31.5	4.6	1.3	10.8	8.3
1976	142.1	14.4	15.9	2.2	58.6	9.9	4.7	-1.6	40.2	7.4
1977	52.4	9.0	3.7	28.3	5.2	117.2	11.1	12.8	2.6	13.6
1979	45.3	2.4	2.8	0.1	18.8	107.4	11.6	11.4	0.0	17.5
1980	44.9	5.3	2.7	6.5	2.3	113.7	11.3	12.3	0.9	15.1
1981	54.3	0.9	4.0	9.4	34.3	67.3	2.1	6.1	15.9	28.7
1982	86.1	5.1	8.3	10.3	2.9	39.3	6.1	2.3	14.4	1.8

Продолжение таблица Г.1

Год	ИЮЛЬ					август				
	X , мм	h_{ϕ} , мм	$h_{пр}$, мм	δh^2	Δh^2	X , мм	h_{ϕ} , мм	$h_{пр}$, мм	δh^2	Δh^2
1983	36.9	2.3	1.6	0.5	20.0	28.0	111	24	7495	13047
2008	28.7	3.8	0.5	10.7	9.0	97.9	225	308	6823	0
2009	159.9	15.1	18.3	10.2	69.5	101.7	384	323	3692	25245
2010	73.9	2.8	6.6	15.2	16.2	35.7	97	56	1672	16557
2011	66.4	2.4	5.6	10.5	19.3	74.3	234	212	469	75
2012	83.1	6.0	7.9	3.6	0.6	53.1	127	126	1	9565
2013	93.3	7.3	9.3	3.9	0.3	77.7	121	226	10993	10829
2014	74.1	2.5	6.7	17.6	18.5	54.5	129	132	11	9344
2015	29.7	2.7	0.6	4.2	16.8	73.4	58	209	22655	27947
2016	94	18.9	9.4	91.6	147.9	163.0	653	572	6574	183036
2017	156	29.8	17.8	144.6	530.4	162.2	1157	569	346429	868786
2018	52.1	4.1	3.7	0.1	7.4	148.0	88	511	178814	18756
2019	77	5.7	7.1	1.8	1.1	131.5	584	444	19530	128692
2020	54.3	-0.4	4.0	18.8	50.9	44.6	167	92	5603	3436
		$h_{\phi \text{ ср}} = 6.78$		$S = 4.34$	$\sigma = 6.67$		$h_{\phi \text{ ср}} = 7.44$		$S = 5.72$	$\sigma = 27.97$
				$S/\sigma = 0.65$					$S/\sigma = 0.72$	

Продолжение таблица Г.1

Год	сентябрь	сентябрь
-----	----------	----------

	X , мм	h_{ϕ} , мм	$h_{\text{пр}}$, мм	δh^2	Δh^2	X , мм	h_{ϕ} , мм	$h_{\text{пр}}$, мм	δh^2	Δh^2
1966	60.8	6.6	5.5	1.3	0.1	46.5	11.4	8.0	12.1	1.5
1967	73.2	4.2	6.3	4.3	4.7	69.0	10.8	14.7	15.2	3.4
1968	46.1	3.5	4.6	1.2	8.4	88.5	10.9	20.6	93.3	3.0
1969	37.4	2.5	4.0	2.2	14.9	73.1	4.4	16.0	134.5	69.1
1971	51.2	2.6	4.9	5.3	14.4	55.9	8.5	10.8	5.4	17.8
1972	7.1	2.7	2.1	0.4	13.1	57.6	5.2	11.3	37.3	56.0
1973	37.4	3.0	4.0	0.9	11.1	32.5	3.6	3.7	0.0	82.9
1975	53.6	1.4	5.0	13.5	25.1	25.3	1.5	1.6	0.0	125.7
1976	45.5	5.7	4.5	1.4	0.4	48.5	4.1	8.6	19.6	73.0
1977	52.6	10.8	5.0	34.5	20.0	64.8	17.9	13.5	20.0	27.7
1979	109.4	3.5	8.5	25.1	8.0	32.2	6.1	3.7	5.9	43.5
1980	195.3	14.1	14.0	0.0	59.3	34.9	13.0	4.5	72.5	0.1
1981	90.1	11.3	7.3	15.7	24.3	114.7	30.1	28.5	2.7	304.4
1982	54.1	8.9	5.1	15.2	6.7	62.6	10.8	12.8	4.0	3.5
1983	52.2	4.2	4.9	0.6	4.9	72.3	11.8	15.7	15.4	0.8

Продолжение таблица Г.1

Год	сентябрь	сентябрь
-----	----------	----------

	$X, \text{ MM}$	$h_{\phi}, \text{ MM}$	$h_{\text{np}}, \text{ MM}$	δh^2	Δh^2	$X, \text{ MM}$	$h_{\phi}, \text{ MM}$	$h_{\text{np}}, \text{ MM}$	δh^2	Δh^2
2008	135.6	15.9	10.2	32.8	91.4	42.5	18.1	6.8	129.7	29.9
2009	71.4	9.1	6.1	8.5	7.3	132.4	44.0	33.8	104.2	982.1
2010	95.8	4.6	7.7	9.4	3.0	57.6	8.1	11.3	10.1	20.8
2011	123.9	4.9	9.5	20.7	2.1	95.3	17.2	22.6	30.0	20.1
2012	70.7	6.2	6.1	0.0	0.0	74.0	18.6	16.2	5.5	34.8
2013	60.8	1.8	5.5	13.4	20.7	37.3	6.1	5.2	0.9	42.5
2014	98.9	0.5	7.9	55.2	35.0	55.5	4.0	10.7	44.1	74.7
2015	28.1	1.4	3.4	4.1	24.7	37.8	2.8	5.3	6.6	98.0
2016	122.9	9.2	9.4	0.1	7.8	70.8	11.3	15.3	16.1	2.0
2017	82.8	19.5	6.9	160.7	173.7	54.1	28.9	10.2	346.7	262.2
2018	85.8	4.3	7.1	7.7	4.3	57.3	5.5	11.2	33.1	52.1
2019	120.4	11.3	9.2	4.1	24.0	105.1	33.1	25.6	56.7	418.0
2020	32.2	4.5	3.7	0.8	3.3	42.7	7.1	6.8	0.1	30.9
		$h_{\phi \text{ cp}}=6.36$		$S = 4.11$	$\sigma = 4.76$		$h_{\phi \text{ cp}}=12.7$		$S = 6.85$	$\sigma = 10.3$
				$S/\sigma = 0.86$					$S/\sigma = 0.66$	

Таблица Г.2 – Результаты поверочных прогнозов притока к водохранилищу

Год	Q_i	h_{i+1}	Q_{i+1} пр	Q_{i+1} факт	dQ^2	ΔQ^2
Июль						
1966	1517	5.0	860	872	144	117135
1967	770	6.5	470	519	2401	115.56
1968	1099	15.2	700	726	676	38514
1969	909	4.7	540	503	1369	715.56
1971	532	11.9	430	532	10404	5.0625
1972	426	3.5	300	219	6561	96566
1973	470	2.0	310	195	13225	112058
1975	730	0.9	425	369	3136	25841
1976	991	14.4	650	969	101761	192941
1977	766	9.0	475	464	121	4323.1
1979	806	2.4	460	511	2601	351.56
1980	702	5.3	445	425	400	10973
1981	883	0.9	490	522	1024	60.063
1982	1006	5.1	590	667	5929	18838
1983	764	2.3	445	488	1849	1743.1
2008	589	3.8	345	407	3844	15068
2009	873	15.1	600	750	22500	48510
2010	1077	2.8	600	714	12996	33948
2011	1092	2.4	600	707	11449	31418
2012	843	6.0	510	588	6084	3393.1
2013	1120	7.3	615	673	3364	20521
2014	434	2.5	280	250	900	78260
2015	520	2.7	325	294	961	55578
2016	569	18.9	500	467	1089	3937.6
2017	930	29.8	740	842	10404	97500

Продолжение таблицы Г.2

Год	Q_i	h_{i+1}	Q_{i+1} пр	Q_{i+1} факт	dQ^2	ΔQ^2
-----	-------	-----------	--------------	----------------	--------	--------------

2018	802	4.1	490	480	100	2475.1
2019	415	5.7	310	265	2025	70093
2020	658	-0.4		415		13168
Август						
1966	872	4.0	515	519	16	23173
1967	519	4.3	350	244	11236	15073
1968	726	3.5	425	468	1849	10247
1969	503	4.4	345	246	9801	14586
1971	532	5.1	360	288	5184	6205.2
1972	219	-2.4		117		62387
1973	195	1.3	190	77	12769	83969
1975	369	4.6	295	138	24649	52337
1976	969	4.7	560	580	400	45466
1977	464	11.1	385	356	841	116.06
1979	511	11.6	410	409	1	1783.1
1980	425	11.3	370	343	729	565.17
1981	522	2.1	320	272	2304	8982
1982	667	6.1	425	413	144	2136.9
1983	488	3.7	335	301	1156	4326.1
2008	407	7.4	315	294	452.41	5335.3
2009	750	12.7	530	612	6742.1	60190
2010	714	3.2	430	366	4051.3	0.1791
2011	707	7.7	460	466	32.149	9780.6
2012	588	4.2	370	367	10.112	0.0022
2013	673	4.0	430	490	3571.3	15126
2014	250	4.2	235	189	2083	31475

Продолжение таблицы Г.2

Год	Q_i	h_{i+1}	Q_{i+1} пр	Q_{i+1} факт	dQ^2	ΔQ^2
2015	294	1.9	235	195	1612	29558
2016	467	21.6	565	630	4257.6	69420

2017	842	38.2	765	1002	55937	402891
2018	480	2.9	340	286	2930.1	6545.3
2019	265	19.3	380	318	3849	2382.7
2020	415	5.5	315	284	935.75	6783.7
Сентябрь						
1966	519	6.6	260	258	4	256.97
1967	244	4.2	140	165	625	11888
1968	468	3.5	230	219	121	3028.3
1969	246	2.5	125	152	729	14891
1971	288	2.6	140	135	25	19329
1972	117	2.7	80	64	256	44113
1973	77	3.0	55	73	324	40413
1975	138	1.4	65	98.1	1095.6	30951
1976	580	5.7	290	325	1225	2597.9
1977	356	10.8	245	328	6889	2912.7
1979	409	3.5	200	278	6084	15.758
1980	343	14.1	230	407	31329	17681
1981	272	11.3	215	190	625	7061.1
1982	413	8.9	250	290	1600	255.03
1983	301	4.2	160	164	16	12107
2008	294	15.9	255	319	4080.7	2011.5
2009	612	9.1	345	541	38302	71118
2010	366	4.6	210	288	6119.9	201.63
2011	466	4.9	240	346	11287	5214.2

Продолжение таблицы Г.2

Год	Q_i	h_{i+1}	Q_{i+1} пр	Q_{i+1} факт	dQ^2	ΔQ^2
2012	367	6.2	190	304	13051	912.62
2013	490	1.8	220	234	183.06	1640.3
2014	189	0.5	85	166	6510.9	11738

2015	195	1.4	90	130	1561.8	20883
2016	630	9.2	345	479	17841	41836
2017	1002	19.5	600	938	114014	440404
2018	286	4.3	160	156	13.177	13844
2019	318	11.3	230	417	35051	20503
2020	284	4.5	170	210	1591.2	4114
Октябрь						
1966	258	11.4	200	289	7921	0.0414
1967	165	10.8	165	195	900	8797.8
1968	219	10.9	185	236	2601	2787.5
1969	152	4.4	115	132	289	24585
1971	135	8.5	140	104	1296	34150
1972	64	5.2	70	43	729	60416
1973	73	3.6	75	108	1089	32687
1975	98.1	1.5	48	82.1	1162.8	42723
1976	325	4.1	175	163	144	15825
1977	328	17.9	310	448	19044	25346
1979	278	6.1	170	184	196	10982
1980	407	13.0	295	393	9604	10858
1981	190	30.1	350	456	11236	27957
1982	290	10.8	225	327	10404	1459.5
1983	164	11.8	175	186	121	10567
2008	319	18.1	320	416	9266	16247

Продолжение таблицы Г.2

Год	Q_i	h_{i+1}	Q_{i+1} пр	Q_{i+1} факт	dQ^2	ΔQ^2
2009	541	44.0	265	660	156072	137837
2010	288	8.1	205	234	850.31	2985.1
2011	346	17.2	280	383	10560	8829.2
2012	304	18.6	300	441	19808	23087
2013	234	6.1	150	186	1311.2	10524

2014	166	4.0	120	126	31.923	26617
2015	130	2.8	75	99	579.85	35992
2016	479	11.3	225	424	39776	18399
2017	938	28.9	645	889	59624	360460
2018	156	5.5	120	150	892.22	19301
2019	417	33.1	445	577	17469	83159
2020	210	7.1	140	155	213.74	18003