



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Краткосрочный прогноз ежедневных расходов воды
весеннего половодья на основе численного решения уравнения
Фоккера-Планка-Колмогорова

Исполнитель Кулакова Анна Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«16» 06 2025г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

	.Стр.
Введение.....	3
1. Физико-географические характеристика.....	7
1.1. Описание р. Полометь.....	10
2 Математическая модель. Описание уравнение ФПК.....	14
2.1. Принцип расчёта слоя стока весеннего половодья.....	16
2.2. Уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова.....	19
3 Расчет и прогноз статистических характеристики слоя стока весеннего половодья.....	22
3.1. Анализ исходных данных	23
3.2. Расчёт стокоформирующих осадков (их характеристика).....	27
3.3. Расчёт коэффициента стока весеннего половодья.....	29
3.4. Расчёт потерь стока	30
3.5. Оценка динамики испарения и уровней грунтовых вод.....	30
3.6. Статистическая проверка слоя стока весеннего половодья.....	33
3.7. Сценарная оценка стока	36
Заключение.....	40
Список используемых источников.....	41

Введение

Водные объекты суши— реки, озёра, водохранилища и болотно-озёрные системы— играют ключевую роль в социально-экономическом развитии. Они являются источником промышленного и коммунального водоснабжения, обеспечивают судоходство, гидроэнергетику, ирригацию, рекреацию и выполняют экосистемные функции. Эффективное управление этими ресурсами немыслимо без надёжных гидрологических прогнозов, позволяющих минимизировать ущерб от наводнений и водного дефицита, а также оптимизировать режим эксплуатации гидротехнических сооружений.

Гидрологические процессы разворачиваются на речных и озёрных водосборах, характеризующихся высокой географической неоднородностью. Режим любого водного объекта формируется под воздействием многочисленных факторов атмосферы, литосферы и биосферы, взаимодействующих во времени и пространстве. Эта сложность, а также неполнота наблюдательной сети приводит к тому, что любой прогноз содержит элемент вероятности.

Весеннее половодье на реках умеренного пояса— одно из наиболее мощных, динамичных и в то же время наиболее сложных для прогнозирования гидрологических явлений. Оно формируется вследствие массового таяния сезонного снежного покрова, сочетания весенних дождей и специфических процессов внутри речного бассейна, к числу которых относят дренирование талых вод через рыхлую поверхностную почву, задержание в ложбинах микрорельефа, аккумуляция в озёрных водоемах и продвижение волны стока по русловой сети с разветвлённой морфологией. Для подавляющего числа водотоков Европейской России весенняя паводковая волна определяет от 60 до 80 % годового стока, задаёт режим эксплуатации водохранилищ и гидроэнергетических комплексов, диктует условия судоходства, определяет водно-экологическую обстановку в поймах и безопасности населения. Социально-экономические последствия аномально высокий половодий исчисляются десятками миллиардов рублей в год, а

климатические и ландшафтные изменения последнего тридцатилетия демонстрируют отчетливую тенденцию к возрастанию частоты и мощности экстремальных паводков.

Несмотря на накопленный опыт прогноза и богатую статистику наблюдений, классические методики, базирующиеся на эмпирических регрессионных зависимостях, либо на концептуальных моделях с упрощённым представлением водного баланса, демонстрируют снижающуюся точность и устойчивость при выходе. Основная причина кроется в том, что эти методы, по существу, экстраполируют усреднённые связи и не охватывают нелинейные и стохастические компоненты водного цикла, проявляющиеся при нестационарных погодных сценариях. Современные вычислительные ресурсы и расширившийся набор гидрометеорологических данных открывают возможность строить более глубокие, физически и статистически обоснованные модели, основанные на стохастических дифференциальных уравнениях. Центральным элементом является уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова, описывающее во времени эволюцию плотности вероятности расхода воды, что позволяет не только оценивать единичные прогнозные траектории, но и количественно определять вероятность превышения критических отметок.

Развитие стохастического подхода особенно актуально для бассейна Валдайской возвышенности-уникально природного района. Это природная «водораздельная башня», характеризующаяся сложным ледниково-моренным рельефом, многочисленными озёрами, глубоким снежным покровом и продолжительной отрицательной температурой в зимне-весенний период. Резкое потепление в марте-апреле приводит к почти одномоментному таянию снега, а промёрзшая почва, лишённая водопоглощающей способности, вынуждает талую воду стекать поверхностно, образуя бурный верховой сток. Синхронизация паводковых волн притоков, наложение дождевых импульсов и образование ледовых заторов обуславливают пиковые расходы, которые за последние два десятилетия превышали средние многолетние значения на 40-50%. Следствием

становятся масштабные подтопления низменных пойм, разрушение дорог, линий электропередачи, объектов сельского хозяйства и туристической инфраструктуры.

К началу двадцать первого века воздействие антропогенных факторов-вырубка лесов, вовлечение целинных земель в агропроизводство, рост урбанизированных территорий, изменение структуры стока водохранилищ, а также глобальное потепление-привело к зримому росту неопределенности гидрологического режима. Анализ ряда средних годовых и максимальных расходов по наблюдательным постам рек Валдайской возвышенности показывает тенденцию к увеличению коэффициента вариации с 0,22 в 1961-1990гг. до 0,31 в 1991-2024гг., а также к сдвигу даты наступления половодья в календаре почти на две недели вперед.

С точки зрения экономики актуальность усиливается прямыми финансовыми потерями: по оценке Минприроды РФ, суммарный ущерб от паводков и подтоплений за период 2010-2023 гг. превысил 420 миллиардов рублей, а если учесть косвенные убытки– приостановку производств, поражение транспортной логистики, деградацию сельхозугодий– показатель удваивается. Каждый не прогнозированный день задержки подачи информации о возможном превышении неблагоприятных отметок увеличивает затраты на аварийно-спасательные мероприятия на 3-4%. Социальная цена ошибок ещё ощутимее: гибель людей, утрата жилья и здоровья имеет необратимый характер.

Научная актуальность исследования заключается в необходимости создать метод, способный объединить физическую сущность процесса формирования стока, современное понимание его стохастической природы и возможности оперативного применения. Численные решения УФПК дают потенциально более гибкий инструмент; параметры могут оперативно пересчитываться при поступлении новых метеоданных, учитывая как крупномасштабные климатические тренды, так и локальные особенности водосбора.

Природа весеннего половодья в условиях умеренного климата определяется взаимодействием тепло- и влагообмена между атмосферой, снежным покровом, грунтом и гидрографической сетью. На первом этапе (период накопления снега) - формируется запас потенциальной воды. Его величина регулируется средней зимней температурой, количеством и кратностью снегопадов, ветровым переносом и залесенностью водосбора. Второй этап (фазовый переход твердой влаги в жидкую) – начинается, когда среднесуточная температура устойчиво превышает отметку ноль градусов. Скорость таяния пропорциональна интегралу положительных температур и мощно усиливается при сочетании теплового потока и дождевых осадков, уменьшая альбедо снега и образуя налив поверхностной воды.

Промёрзшая почва, характерная для Валдайской возвышенности, препятствует инфильтрации, превращая талую воду в поверхностный сток. В этот момент активируются микрорельефные задержатели – ложбины и межхолмовые понижения, которые на несколько суток аккумулируют воду, снижая и размывая пик. Дальнейшее продвижение волны регулируется плотность и разветвлённостью русловой сети. Участки с озёрами, многочисленными старицами и заболоченными поймами действуют как буфер, выравнивая гидрограф, тогда как узкие долины со значительным продольным уклоном усиливают скорость течения и резкость пика. Сильнейшие экстремумы возникают, когда наступает так называемая фаза наложения притоков: паводковые волн из удалённых суббасейнов приходят в главный створ одновременно, а сверху накладывается выпадение теплых дождей. Такая ситуация была зафиксирована, например, в апреле 2013г., когда суммарный расход р. Мста у створа Боровичи превышал средние многолетние значения почти в 1,5 раза, а уровни воды поднялись на 2,7 метра за трое суток.

1. Физико-географическое положение

Валдайская возвышенность (далее–Валдай)-ключевой орографический узел Русской равнины. Здесь, на территории свыше 600 км, зарождаются бассейны сразу трёх великих речных систем–Каспийской (Волга), Балтийской (Западная Двина, Мста) и Черноморской (Днепр).

Гляциально-моренный рельеф, высокая заболоченность, большое количество озёр и обилие леса формируют уникальную физико-географическую пьесу, в которой климат, гидрология и растительный покров связаны тесными обратными связями.

Современный рельеф– это сочетание моренных гряд, валов и равнин, чередующихся с ледниковыми ложбинами. В геологическом строении района принимают участие породы палеозойского и четвертичного возраста. Палеозойские отложения представлены комплексом пород верхнего девона и нижнего карбона.

В основании Валдая лежит волнистая плита фенно-скандийского кристаллического фундамента, перекрытая мощными четвертичными отложениями от 30 до 120м. поздневалдайского оледенения. Подземные воды этих отложений имеют наибольшее влияние на формирование стоков.

Высочайшая отметка– 346,9 м над уровнем моря («Макушка Валдая»).

Первую половину XX века думали, что высочайшая точка Валдая- 343 метра, но и эти данные периодически менялись. В 1997-2001 годах участники краеведческого кружка под руководством учителя Н.А. Брагина установили, что высшая моренной гряды находится в 60 метрах от геодезического знака и равна 346.9 м.

Самая высшая точка- не холм и не гора, а просто поляна. И известно это место только картографам, географам и заядлым туристам.

Самые высокие точки Новгородской области: гора Рыжоха (296 м БС) и гора Ореховна (288 м БС). На этой территории расположены зоны питания водоносных горизонтов и артезианских бассейнов, питающих реки бассейнов Волги, Западной Двины и Волхова на значительном протяжении и являющихся источником водоснабжения множества городов и населенных пунктов.

Температурный режим

Согласно многолетним данным станции Валдай (1961-2020) Среднегодовая температура воздуха составляет $+4,1^{\circ}\text{C}$; средняя температура самого теплого месяца (июль)– $+17^{\circ}\text{C}$; самого холодного (январь)– -9°C . Годовая амплитуда достигает 26°C , подтверждая умеренно-континентальный тип климата.

Атмосферные осадки

На водораздельных грядах выпадает до 820-840 мм осадков в год. Минимальные значения приходятся на февраль- приблизительно 45мм. Максимальные на июль-август, и составляют около 130 мм. Снежный покров держится в среднем 140 суток, его максимальная высота 40-45 см. В структуре годового влажностного баланса 53% осадков выпадает в виде дождя, 26% в виде снега и 21%- смешанных фаз.

Годовой и максимальный сток

Весеннее половодье (апрель- начало июня) формирует 55-65% годового стока. Летняя межень характеризуется расходами в 4-6 раз меньшими, чем в половодье, но нередко прерывается дождевыми паводками. Зимняя межень стабильно благодаря устойчивому подледному грунтовому дренажу.

По данным проектных расчетов для Верхневолжского каскада максимальный разовый расход воды достигает $420 \text{ м}^3/\text{с}$ (плотина Верхневолжского бейшлота) – в 14 раз выше многолетнего среднего.

Причиной является аккумуляция водно-снеговых запасов на ледниковых равнинах, малая вместимость русел и отсутствие крупных водоемов- регуляторов в пределах верховьев.

Озёрность

В границах Валдайского национального парка насчитывается свыше 200 водоемов общей площадью 15000 га, что составляет около 9,4 % территории парка. На всей Валдайской возвышенности количество озёр превышает 500, однако площадь зеркал, как правило, не превышает 1-2% от площади ландшафтных районов. Крупнейшие озёрно-речные системы-Верхневолжские озёра (Пено, Вселуг, Волго) и оз. Селигер.

Залесённость

Современная доля лесов на Валдайской возвышенности оценивается около 90% (для национального парка 85,9%), с доминированием хвойных (ель 45%, сосна 28%) и мелколиственных пород, таких как берёза, осина. Естественные широколиственные участки (дубрава, липняк) редки и приурочены к юго-западным склонам.

Исторически наиболее интенсивно распахан западный склон возвышенности. По данным региона, площадь пашни после 1990-х сократилась на 60%, и в настоящее время не превышает 8-10% общей площади сельскохозяйственных угодий. Массовый вывод земель в залежь стимулировал вторичное зарастание березовыми и осиновыми лесами, так же частичную рекультивацию под сенокосы.

Водный баланс и коэффициент стока

Сводный водно-тепловой баланс для центральной части Валдая:

- Осадки – 820 мм/год
- Речной сток – 185-200 мм/год (коэффициент стока 0,23-0,25)

Для лесных водосборов с незначительной распаханностью наблюдается более высокий коэффициент стока (до 0,30), тогда как на мозаичных сельхоз-ландшафтах он падает до 0,15 вследствие повышенного испарения с открытых поверхностей.

Изменение природных условий

Комплексное влияние климатического потепления (рост среднегодовой температуры на 0,8°C за последние 40 лет) и изменения землепользования проявляется в некоторых случаях:

1. Удлинение безледного периода рек на 10-12 суток;
2. Увеличение доли дождевых паводков в летне-осенний период;
3. Постепенном увеличении лесопокрытой площади за счёт зарастания заброшенных пашен;
4. Сокращения модуля весеннего стока (-7% за 1980-2020 гг.) при одновременном росте зимних расходов (от +12% на малых реках до +20% на сегменте Верхней Волги).

1.1 Описание реки Полометь

Река Полометь – правый приток реки Полы, принадлежащий бассейну озера Ильмень и далее Волхово-Ладужской водной системе. Русло протянуто с северо-запада на юго-восток в пределах Новгородской области, пересекая Валдайскую возвышенность и прилегающую к ней неотчетливую ледниково-водноледниковую равнину. Гидрологические наблюдения на реке ведутся с начала XX века. Наиболее продолжительная и представительная серия уровня воды и расхода собрана на водомерном посту Яжелбицы, расположенному в 82 км от истока и 68 км от устья. Именно эти данные положены в основу настоящего исследования.

Орография

- Координаты истока (оз. Русское): 57° 59' с. ш., 32° 38' в. д., абсолютная отметка 188 мБСВ;
- Координаты устья (впадение в Полу); 57° 46' с. ш., 32° 49' в.д., отметка 113м;
- Длина реки– 150 км;
- Площадь водосбора– 2 767 км² (по ГВР, 2023г.);
- Средний продольный уклон– 0,50 м/км (учитывая перепад 75м);
- Крупнейший приток– р. Ярынья (длина 53 км, бассейн 412 км²).

Бассейн вытянут меридионально, ассиметричен. Восточная его часть осложнена моренно-зандровыми грядами Валдайской гряды, западная– более ровная, с заболоченными понижениями. Четко выражены три гидрогеоморфологических участка русла. Верхний высокоскоростной (0-40 км), средний порожно-перекатный (40-110 км, включая пост Яжелбицы) и нижний равнинный (110-150 км).

Коренные породы представлены кристаллическими сланцами и гранитами Балтийского щита, перекрытыми покровными валдайскими моренами, мощностью до 40 м. В долинах расположены аллювиальные пески и супеси с прослоями торфа. Почвенный покров формируют дерново-подзолистые, торфяно-болотные и лесные почвы. Которые составляет 58 %, 24 % и 18 % соответственно. Геология определяет низкую минерализацию речных вод и слабую буферность рН.

Климат умеренно-континентальный с хорошо выраженным снежным покровом, высотой от 38 до 54 см. Дата устойчивого снеголежания – 21 ноября, сход– 6 апреля. Относительно высокая влажность обуславливает водность рек, однако расположение на Валдайской возвышенности придаёт стоку ярко выраженную снеговую принадлежность.

Структура годового стока

По данным поста Яжелбицы, в период с 1961-2024гг. средний многолетний расход воды составляет $7,74 \text{ м}^3$, что эквивалентно модулю стока 2,8 и слою годового стока 88 мм. Распределение внутри года характерно для снегового типа равнинно-смешанного подтипа.

Таблица 1 – структура годового стока р. Полометь пост Яжелбицы

Период	Доля годового стока, %	Характеристика
Весенний паводок (апрель-май)	53	Быстрый подъем за 6-8 суток ($Q_{\max}=145-220 \text{ м}^3/\text{с}$) и спад за 20-25 суток.
Летне-осенние дожди	32	Серия коротких волн, амплитуда $30-60 \text{ м}^3/\text{с}$. В засушливые годы вероятен летний минимум до $1,4 \text{ м}^3/\text{с}$.
Зимняя межень	15	Средняя $Q_{\min}= 1,7 \text{ м}^3/\text{с}$. Устойчивый ледостав до 135 суток.

Ледовый режим

- Начало ледообразования: 5-12 ноября;
- Полный ледостав: 24 ноября;
- Толщина льда: 0,55-0,77 м (февраль-март);
- Вскрытие: 18-25 апреля;
- Продолжительность безлёдного периода: 214 ± 7 суток.

Паводки и затопления

Говоря о данных явлениях хочется отметить, что происходят они довольно редко, примерно 1-2 раза в 10 лет. Крупнейшее зарегистрированное половодье было – 4 апреля 2000г. Уровень воды в р. Полометь до 327 см относительно НП.

Водный баланс.

Таблица 2 – Водный баланс

Статья баланса	мм/год	% осадков
Атмосферные осадки	715	100
Суммарное испарение с суши и водоёмов	450	63
Подземный сток	30	4
Русловой сток	88	12

Таким образом коэффициент стока составляет 0,12. Данные значения типичны для лесных водосборов северо-запада России.

Антропогенное воздействие

С 1930-х гг. русло частично выпрямлено на 10,3 км для нужд лесосплавного хозяйства (не действует с 1984 г.). На 2005-2024 гг. приходится активное освоение берегов под индивидуальное жилое строительство. В связи с этим появились точечные источники загрязнения – коммунальный выпуск с. Яжелбицы. В границах федерального Валдайского национального парка установлен режим строгой охраны, позволяющий сохранить высокое качество вод.

Река Полометь по данным поста Яжелбицы характеризуется умеренной водностью, чётким снеговым режимом, низкой минерализацией и высоким экологическим качеством вод. Сохранившийся естественный гидрограф и ограниченное антропогенное давление делают водную систему эталоном рек северо-запада России.

2. Математическая модель. Описание ФПК

Математическое моделирование процессов, связанных с расходом воды в реках, имеет важное значение для понимания гидрологических явлений, таких как весеннее половодье. Одним из подходов к описанию этих процессов является использование уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова, которое позволяет моделировать вероятностные распределения состояний системы во времени. В контексте весеннего половодья, это уравнение может быть использовано для прогнозирования изменений в расходе воды на основе наблюдений, что имеет практическое применение в управлении водными ресурсами, проектировании гидротехнических сооружений и предупреждении наводнений.

Весеннее половодье, как правило, происходит в результате интенсивного таяния снега и обильных дождей, что приводит к резкому увеличению уровня воды в реках. Процесс, в свою очередь, может быть описан через динамику изменения расходов воды, которая подвержена множеству случайных факторов, таких как температура, количество осадков, скорость таяния снега и другие метеорологические условия. Эти факторы могут быть представлены в виде случайных процессов, что делает применения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) особенно актуальным.

Уравнение ФПК описывает эволюцию вероятностной плотности состояния системы, что позволяет нам прогнозировать, как распределение вероятностей расходов воды будет изменяться с течением времени. В общем виде уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = -\partial[A(x)P(x, t)]/\partial x + \left(\frac{1}{2}\right)\partial^2[B(x)P(x, t)]/\partial x^2$$

Где $P(x, t)$ – это вероятность нахождения системы в состоянии x в момент времени t , $A(x)$ – дрейфовая функция, описывающая среднее изменение состояния, а $B(x)$ – диффузионная функция, отражающая случайные колебания.

В контексте моделирования весеннего половодья, x может представлять собой расход воды в реке, а t – время. Дрейфовая функция $A(x)$ может быть связана с средним расходом воды, который зависит от метеорологических условий, таких как температура и количество осадков. В то время, как диффузионная функция $B(x)$ может отражать степень неопределенности и случайности, связанной с этими метеорологическими факторами. Например, в условиях сильного дождя или резкого потепления диффузия может увеличиваться, что приведет к большему разбросу значений расхода воды.

Для более точного описания процесса весеннего половодья необходимо учитывать не только метеорологические условия, но и характеристики самой реки, такие как её ширина, глубина, уклон и наличие водоёмов, которые могут влиять на скорость и направление течения. Эти параметры могут быть включены в модель через соответствующие функции $A(x)$ и $B(x)$. Например, уклон реки может влиять на дрейфовую функцию, увеличивая средний расход воды, в то время как ширина и глубина могут влиять на диффузные свойства потока.

Для численного решения уравнения ФПК можно использовать различные методы, такой как метод конечных разностей. Этот метод позволяет учитывать сложные геометрические формы реки и её окрестностей. Выбор метода зависит от конкретных условий задачи, а также от доступных вычислительных ресурсов.

При проведении численного исследования важно учитывать начальные и граничные условия. Начальные условия могут быть заданы на основе исторических данных о расходах воды в реке, собранных за предыдущие годы. Граничные условия определяются на основе прогнозов метеорологических условий, таких как ожидаемое количество осадков и температура, что позволит более точно смоделировать процесс весеннего половодья.

Одним из ключевых аспектов применения уравнения ФПК в данном контексте является возможность получения краткосрочных прогнозов. Используя результаты численного решения, можно получить вероятностные распределения

расходов воды на ближайшие дни, что позволит эффективно планировать управление водными ресурсами и минимизировать риски, связанные с наводнениями.

Таким образом, математическое моделирование процесса расхода воды весеннего половодья на основе уравнения ФПК представляет собой мощный инструмент для прогнозирования и управления водными ресурсами. Используя этот подход, можно значительно улучшить понимание динамики речных систем и разработать эффективные стратегии для минимизации последствий.

2.1 Принцип расчета слоя стока весеннего половодья. Анализ гидрографа

Гидрограф стока – это графическое изображение хода колебания расходов воды в реке в течение некоторого времени. Интервал времени, в течение которого рассматривается изменение стока, может быть любым: месяц, год, многолетний период, сезон года и т.д.

Гидрограф отражает характер распределения водного стока в течение года, сезона, половодья (паводка), межени. Гидрограф используется для вычисления эпюры руслоформирующих расходов воды.

Единичный гидрограф — гидрограф, показывающий изменение расходов воды во время единичного паводка.

Типовой гидрограф — гидрограф, отражающий общие черты внутригодового распределения расхода воды в реке.

Многолетний гидрограф паводка — расчётная паводочная волна в определённом створе водотока, характеризующаяся определённым многолетним расходом, типовым гидрографом и соответствующим объёмом.

Гидрограф стока реки — это графическое изображение хода колебания расходов воды в реке в течение некоторого времени. Интервал времени может быть любым: месяц, год, многолетний период, сезон года и т. д.

Гидрограф строится на основании данных о ежедневных расходах воды в месте наблюдения за речным стоком. На оси ординат откладывается величина расхода воды, на оси абсцисс – отрезки времени.

Для построения гидрографов стока используют различные методы, например:

Математическое моделирование. Например, с помощью гидрологических моделей с распределёнными параметрами, которые описывают процессы формирования стока в бассейнах с различными физико-географическими характеристиками. Расчленение гидрографа по видам питания. Позволяет определить долю различных источников питания реки (подземного, дождевого, снегового).

Гидрографы стока применяются для решения различных задач, например:

Выявление закономерностей внутригодового распределения стока. Это помогает понять, как расходы воды меняются в течение года, сезона, половодья (паводка), межени.

Проектирование гидротехнических объектов. Расчётные гидрографы стока используют при проектировании водохранилищ, отводе вод от сооружений в период их строительства, расчёте затопления пойм и лиманов, пропуске высоких вод через дорожные и другие искусственные сооружения.

Графическое изображение очень наглядно, так как оно позволяет выявить закономерности внутригодового распределения стока на реках.

С гидрографом стока рек ограниченного региона, можно выявить общую закономерность годового распределения стока для данной территории. Таким образом были выявлены типовые гидрографы стока для разных регионов нашей страны. Гидрограф также дает возможность определить составляющие приходной части водного баланса реки, т.е. установить долю подземного, снегового и дождевого притоков. Для характеристики условий питания реки необходимо

выделить основной источник питания, который дает больше половины объема годового стока и существенно влияет на распределение стока реки в году. Существует простая схема расчленения гидрографа стока реки, предложенная Б.В. Поляковым. Она основана на том, что подземное питание по мере подъема весеннего половодья постепенно снижается, прекращаясь при прохождении наибольшего расхода, и возрастает на спаде половодья, когда происходит отдача воды поймой реки. Это вызвано тем, что при повышении уровня воды в реке происходит уменьшение гидравлических уклонов и расходов подземного потока в реку, нередко возникают даже обратные гидравлические уклоны и инфильтрация речных вод в берега. В период спада уровня воды в реке наблюдается возвращение речных вод в русло.

Строят гидрограф по данным, взятым из гидрологических ежегодников о ресурсах поверхностных вод суши. Каждая таблица «ежегодника» содержит сведения о ежедневном среднесуточном расходе воды.

При построении гидрографа по горизонтальной оси откладывают время (месяцы и дни), по вертикальной оси – расходы. Для каждого дня отмечают значение расхода.

Водный режим реки Полометь характеризуется значительной изменчивостью внутригодового стока, в то время как изменения годового стока невелики: коэффициент вариации колеблется от 0,37 до 0,30 постепенно уменьшаясь от верхних створов к нижним. У с. Яжелбицы расходы воды в течение года могут изменяться от 1,0 м³ /с в межень до 116 м³ /с в половодье. Вместе с тем, в многолетнем ряду максимальных годовых расходов воды обнаруживается два разных по водности периода: период относительно большой водности (до 1970 года) и период заметно меньшей водности (с 1970 года по 1999 год). Максимальные расходы воды первого десятилетия XXI века занимают, в целом, промежуточное положение между расходами периодов большой и меньшей водности. Внутригодовое распределение стока воды в Полотеи характеризуется

хорошо выраженным весенним половодьем и летней меженью, переходящей в серию летне-осенних дождевых паводков. Паводки и Половодье отличаются крутым подъемом и растянутым спадом уровня воды. В среднем продолжительность половодья составляет 40 суток, а продолжительность дождевых паводков 1-2 недели. Характерные гидрографы стока Поломети по водомерному посту Яжелбицы приведены на рисунке 1.

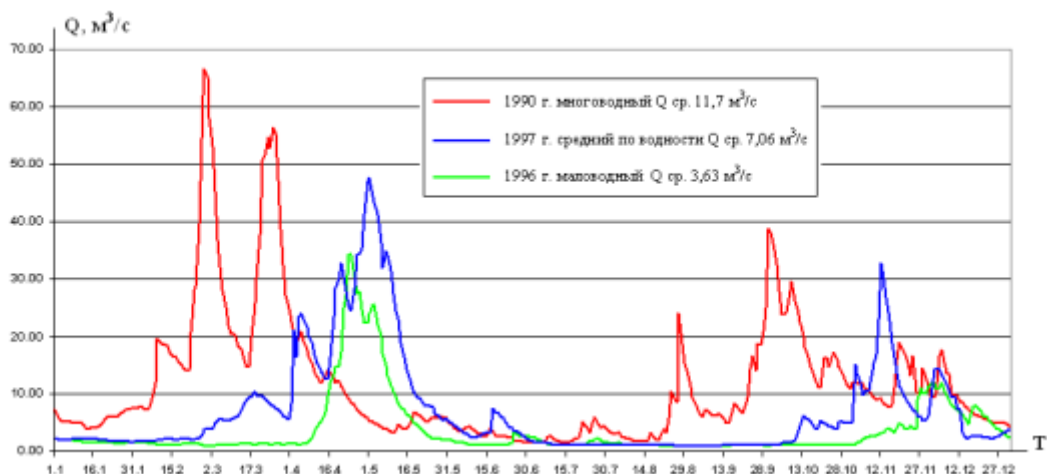


Рис. 1 - Характерные гидрографы реки Полометь по гидроствору Яжелбицы

2.2 Уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова

Искомое уравнение, описывающее эволюцию плотности вероятности, впервые вывел Колмогоров А.Н., хотя его модификации встречались ранее в других работах учёных, отсюда и название уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова.

Уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial p(Q, t)}{\partial t} = \frac{\partial (A(Q, t)p(Q, t))}{\partial Q} + 0.5 \frac{\partial^2 (B(Q, t)p(Q, t))}{\partial Q^2}$$

где $p(Q, t)$ — плотность вероятности; Q — расход воды (слой стока, модуль); t — время.

Коэффициенты сноса $A(Q, t)$ и диффузии $B(Q, t)$ выражаются формулами:

$$A(Q, t) = -(\bar{c} - 0.5G_{\bar{c}})Q - 0.5G_{\bar{c}\bar{N}} + \bar{N}$$

$$B(Q, t) = G_{\bar{c}}Q^2 - G_{\bar{c}\bar{N}}Q + G_{\bar{N}}$$

где $G_{\bar{c}}$, $G_{\bar{N}}$ и $G_{\bar{c}\bar{N}}$ – интенсивности и взаимная интенсивность шумов, а \bar{c} и \bar{N} – математические ожидания (они могут быть функциями времени). Уравнение и формулы являются следствиями стохастического обобщения одномерной модели склонового стока с сосредоточенными параметрами:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{\dot{x}}{\tau}$$

где k – коэффициент стока; τ – время релаксации речного бассейна; X & – интенсивность осадков.

Уравнение можно записать в виде стохастического дифференциального уравнения:

$$dQ \equiv [-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N}]dt$$

где $c = 1/k\tau$, $N = X/\tau$, причем $c = \bar{c} + \tilde{c}$, $N = \bar{N} + \tilde{N}$ (здесь \tilde{c} и \tilde{N} – белые коррелированные шумы).

Данное уравнение статистически эквивалентно уравнению ФПК, численную реализацию которого рассмотрим на примере эволюции плотности вероятности расхода воды в замыкающем створе речного бассейна при известных параметрах (k и τ) и заданном ходе дождя $X(t)$ & и статистических характеристик шумов $G_{\bar{c}}$, $G_{\bar{N}}$, $G_{\bar{c}\bar{N}}$, т. е. интенсивностей (знак осреднения над обозначением интенсивности осадков не должен смущать, так как осреднение статистическое, а не временное).

Для численного решения уравнения ФПК используем следующую конечно-разностную аппроксимацию:

$$\frac{(\rho_j^{i+1} - \rho_j^i)}{\Delta t} = -\frac{(A_j^i - \rho_j^i - A_{j-1}^i \rho_{j-1}^i)}{\Delta Q} + 0.5 \frac{(B_{j+1}^i \rho_{j+1}^i - 2B_j^i \rho_j^i + B_{j-1}^i \rho_{j-1}^i)}{(\Delta Q)^2}$$

где i и j – номера расчетных шагов по времени и расходу соответственно.

Это так называемая разностная схема. Она проста логически, однако при ее использовании существует опасность потери устойчивости счета при

переходе от одного временного слоя к другому, так как незначительная погрешность, возникающая, например, в результате округлений, может возрастать от слоя к слою. Как и в случае модели кинематической волны необходимо соблюдать определенные условия устойчивости, связанные с интенсивностью шумов и соотношением шагов Δt и ΔQ .

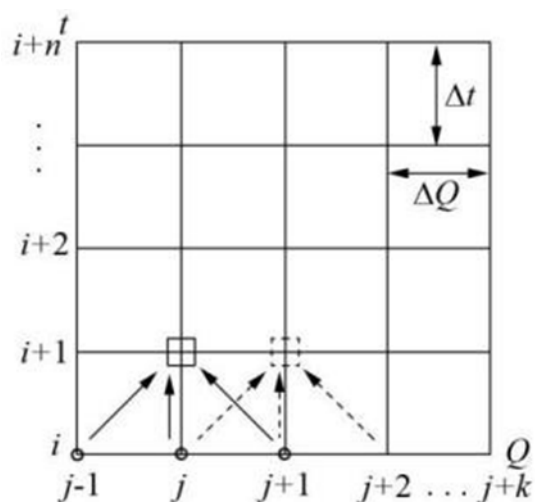


Рис. 2 – Иллюстрация алгоритма вычисления в соответствии с конечно-разностной аппроксимацией

3. Расчет и прогноз статистических характеристики слоя стока весеннего половодья

Слой стока весеннего половодья определяется климатическими условиями данной территории и факторами подстилающей поверхности.

Метеорологические факторы, как снегозапасы в бассейне реки, интенсивность снеготаяния и его продолжительность, предшествующее снеготаянию увлажнение почво-грунтов и их промерзаемость, испарение в период подъёма половодья, особенно в период снеготаяния, имеют особое значение в процессе формирования весеннего половодья. Также особую роль играют осадки, выпадающие в период подъёма половодья. В данном разделе работы рассматривается влияние уровней грунтовых вод, испарения с почвы, стокоформирующие осадки на формирование слоя стока весеннего половодья.

3.1. Анализ исходных данных

Таблица 3 – Исходные данные с 1961-1990 гг.

Год	Хгод	Ндн	Хсф	Дата н	Nd н	Дата к	Nd к	h, мм	N, п	Nt тп	T тп	Nt хп	T хп
1961	739	201	342,1	07/03	66	05/05	125	143	60	104	211	315	179
1962	806	182	286,7	06/04	96	11/05	131	161	36	91	221	312	141
1963	505	200	176,8	12/04	102	25/05	145	87,8	44	99	227	326	152
1964	554	172	137,4	15/04	106	09/05	130	79,8	25	90	220	310	129
1965	611	194	248,4	16/04	106	17/05	137	123	32	102	210	312	158
1966	722	190	357,1	02/04	92	16/05	136	239	45	88	212	300	141
1967	773	215	317,7	31/03	90	28/05	148	147	59	60	263	323	125
1968	740	192	327,6	24/03	84	26/05	147	212	64	81	230	311	123
1969	694	204	247,8	13/04	103	28/05	148	137	46	99	233	332	154
1970	593	173	209,3	06/04	96	19/05	139	123	44	92	210	302	125
1971	705	202	218,8	25/03	84	17/05	137	111	54	85	225	310	148
1972	523	185	151,3	07/04	98	06/05	127	68,9	30	88	235	323	143
1973	824	171	268,8	29/03	88	07/05	127	133	40	83	210	293	126
1974	732	224	331,3	03/04	93	31/05	151	156	59	84	243	327	156
1975	648	164	267,2	15/03	74	04/05	124	134	51	64	238	302	102
1976	691	210	356,3	10/04	101	23/05	144	176	44	86	201	287	149
1977	786	214	287,3	06/04	96	14/05	134	148	39	92	240	332	171
1978	732	175	260,6	30/03	89	21/05	141	167	53	86	242	328	119
1979	596	182	210,9	01/04	91	23/05	143	145	53	81	215	296	118
1980	780	220	296,8	15/04	106	27/05	148	110	43	91	211	302	160
1981	835	211	368,3	23/03	82	26/05	146	173	65	79	229	308	143
1982	607	209	311,9	29/03	88	31/05	151	172	64	84	251	335	141
1983	887	154	266,1	26/03	85	02/05	122	123	38	73	242	315	103
1984	684	191	324,8	01/04	92	17/05	138	155	47	88	227	315	138
1985	762	197	244,2	09/04	99	25/05	145	144	47	72	247	319	123
1986	817	183	273,6	27/03	86	16/05	136	179	51	79	258	337	125
1987	794	177	310,7	23/04	113	27/05	147	162	35	87	223	310	115
1988	666	202	267,6	30/03	90	23/05	144	151	55	78	226	304	133
1989	812	190	327,0	04/02	35	07/05	127	229	93	55	264	319	117
1990	957	160	387,4	08/02	39	23/04	113	264	75	52	259	311	98

Таблица 4 – Исходные данные с 1991-2020 гг.

Год	Хгод	Ндн	Хсф	Дата н	Nd н	Дата к	Nd к	h, мм	N, п	Nt тп	T тп	Nt хп	T хп
1991	745	185	308,7	21/03	80	09/05	129	145	50	77	262	339	131
1992	787	172	382,0	17/03	77	22/05	143	205	67	57	229	286	83
1993	726	217	433,6	18/03	77	16/05	136	190	60	73	223	296	153
1994	708	207	295,7	05/04	95	17/05	137	197	43	90	217	307	159
1995	767	201	364,5	10/04	100	21/05	141	127	42	45	260	305	103
1996	590	207	224,3	10/04	101	23/05	144	87,9	44	93	254	347	153
1997	788	164	361,9	31/03	90	24/05	144	176	55	90	205	295	109
1998	1004	211	397,5	13/04	103	20/05	140	111	38	96	216	312	166
1999	699	186	339,5	29/03	88	11/05	131	201	44	78	233	311	131
2000	747	190	352,9	03/04	94	12/05	133	165	40	90	236	326	144
2001	780	161	281,5	02/04	92	30/04	120	124	29	90	228	318	130
2002	655	174	292,2	17/03	76	06/05	126	132	51	69	215	284	116
2003	829	228	347,3	13/04	103	25/05	145	106	43	83	231	314	164
2004	955	182	299,5	22/03	82	07/05	128	148	47	72	250	322	123
2005	771	168	270,4	07/04	97	03/05	123	81,4	27	92	231	323	136
2006	725	172	219,5	04/04	94	09/05	129	101	36	88	264	352	130
2007	841	129	256,0	10/03	69	24/04	114	95,3	46	61	247	308	74
2008	870	183	299,3	31/03	91	02/05	123	119	33	86	257	343	143
2009	915	156	268,8	29/03	88	12/05	132	140	45	87	252	339	110
2010	843	170	280,9	29/03	88	23/05	143	160	56	86	239	325	112
2011	881	187	389,1	03/04	93	25/05	145	237	53	92	262	354	132
2012	825	150	236,9	14/04	105	15/05	136	115	32	97	233	330	108
2013	828	168	253,1	14/04	104	11/05	131	126	28	101	228	329	137
2014	633	158	276,1	11/03	70	01/05	121	87,3	52	66	253	319	102
2015	674	183	283,6	03/04	93	15/05	135	103	43	51	310	361	97
2016	882	140	232,2	30/03	90	12/05	133	107	44	87	217	304	91
2017	990	197	426,4	02/04	92	14/05	134	160	43	67	258	325	129
2018	643	173	302,7	04/04	94	12/05	132	132	39	92	224	316	132
2019	1147	173	250,3	20/03	79	02/05	122	100	44	74	252	326	123
2020	880	129	318,9	16/02	47	27/03	87	94,4	41	42	291	333	81

Пояснение к таблицам 1 и 2:

Ндн Число дней стокоформирующих осадков

Хсф Стокоформирующие осадки

Дата н Дата начала половодья

Nd н Порядковый номер дня начала половодья с начала года

Дата к Дата окончания половодья

Nd к Порядковый номер дня окончания половодья с начала года

h, мм Слой стока весеннего половодья

Nt тп Порядковый номер дня устойчивого перехода температуры через 0 весной к теплому периоду

T тп	Продолжительность теплого периода, дни
Nt хп	Порядковый номер дня устойчивого перехода температуры через 0 осенью к холодному периоду
T хп	Продолжительность холодного периода, дн

При анализе слоя стока весеннего половодья за период с 1961-2020 гг. выявлено увеличение стока до 1991 года, дальше события развиваются иначе. Слой стока весеннего половодья уменьшается, годовой слой стока выравнивается, а оставшаяся часть стока $h = h_{\text{год}} - h_{\text{вес.половодья}}$ увеличивается. То есть имеет место увеличение минимального стока летне-осенней и зимней межени. Хронологический график (рис. 3) модуля стока весеннего половодья и разностно-интегральной кривой (РИК) демонстрирует два цикла водности (многоводный и маловодный соответственно).

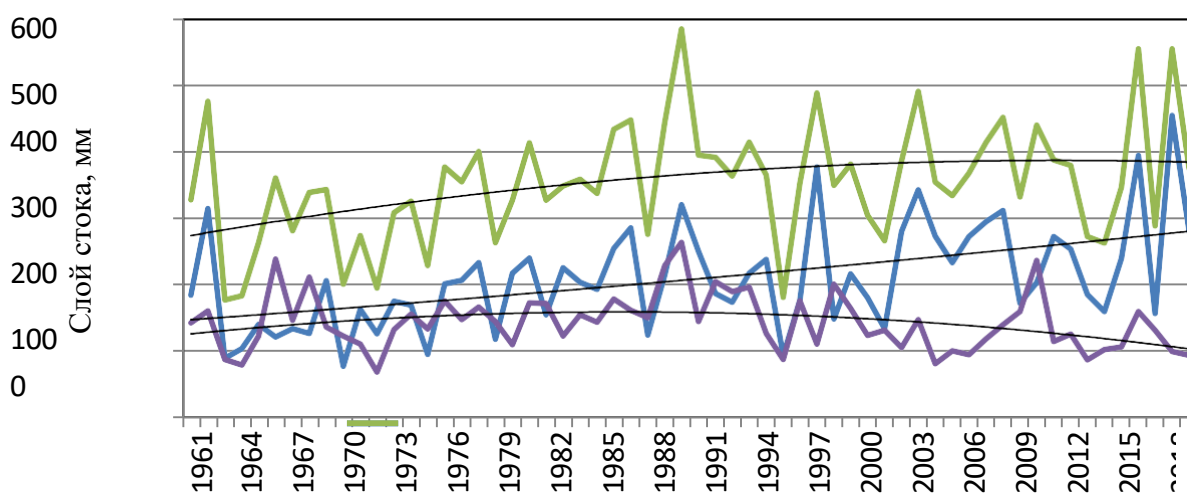


Рисунок 3 – Хронологический график слоя стока весеннего половодья, годового слоя и слой стока за оставшуюся лимитирующую часть года

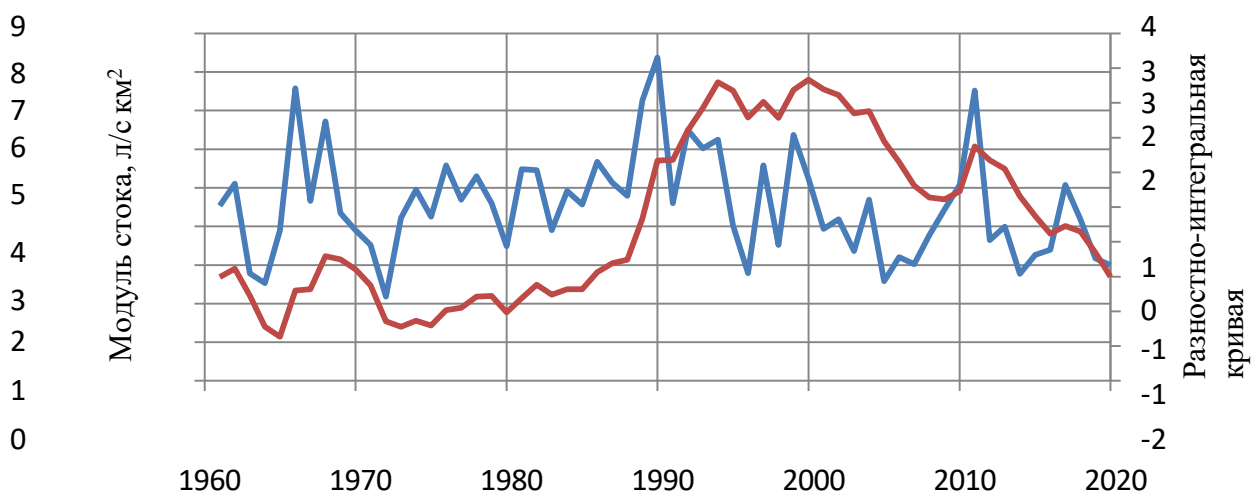


Рисунок 4 – Хронологический график модуля стока весеннего половодья и разностной интегральной кривой

3.2. Расчёт стокоформирующих осадков (их характеристика)

На хронологическом графике(рис.5) можно отметить увеличение осадков за тёплый период и в целом за год, и незначительное уменьшение в холодный период.

$X_{сф}$ – стокоформирующие осадки определяются суммой выпавших осадков от даты устойчивого перехода через 0^0 осенью до окончания весеннего половодья.

$X_{хп}$ – осадки холодного периода определяются от даты устойчивого перехода через 0^0 осенью до даты устойчивого перехода через 0^0 весной. Осадки тёплого периода определяются разницей между стокоформирующими осадками и осадками за холодный период: $X_{тп} = X_{сф} - X_{хп}$.

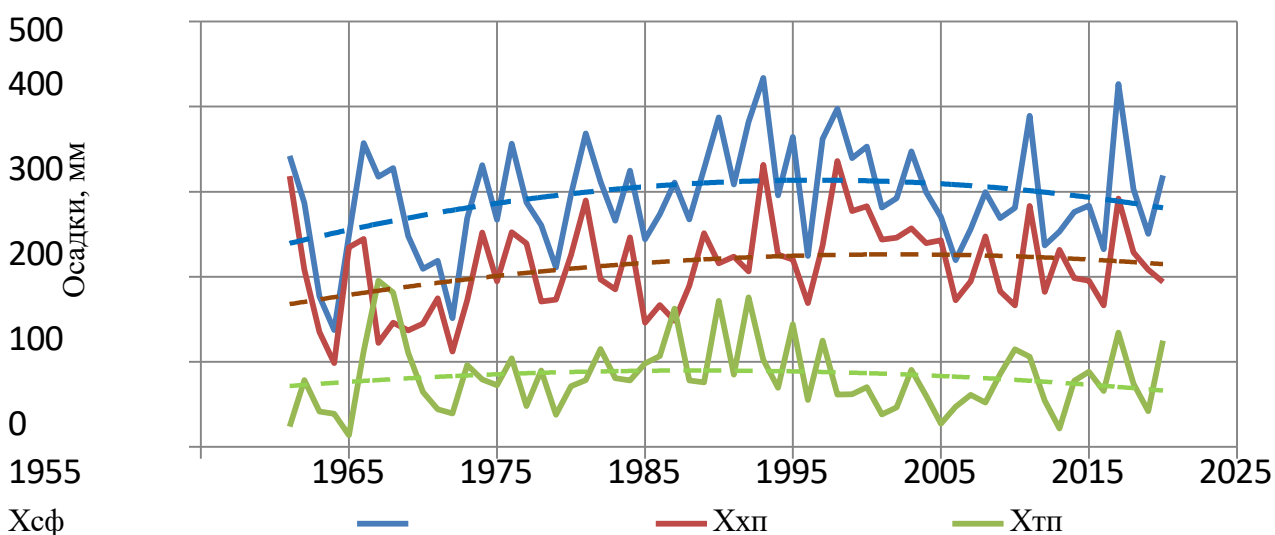


Рисунок 5 – Хронологический график стокоформирующих осадков, осадков за холодный период и осадков за теплый период, а также осадков за безстокоформирующий период года и за год

На хронологическом графике (рис.6) представлено число дней стокоформирующих осадков. Наблюдается уменьшение количества дней этого периода. Число дней стокоформирующих осадков сокращается, а количество осадков практически нет.

Н_{дн} – Число дней стокоформирующих осадков определяется от даты устойчивого перехода через 0 осенью до окончания весеннего половодья.

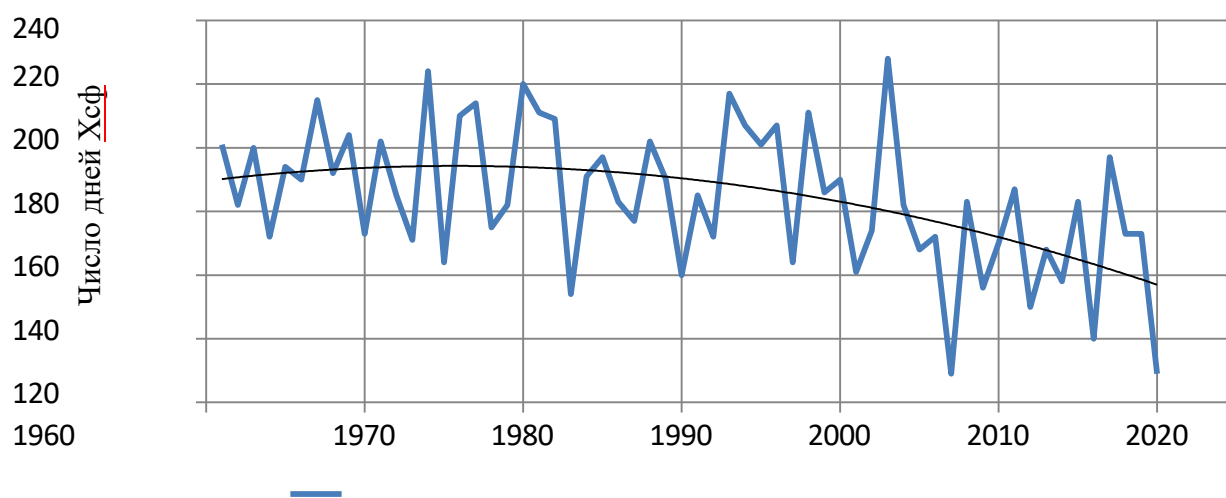


Рисунок 6 – Хронологический график числа дней стокоформирующих осадков весеннего половодья

3.3. Расчёт коэффициента стока весеннего половодья (его динамика)

Коэффициент стока весеннего половодья уменьшается, начиная с 1990-х, а температура воздуха увеличивается (рис.7). Коэффициент стока весеннего половодья — это безразмерная величина, которая показывает, какая доля осадков переходит в сток или какая часть осадков расходуется на образование стока. Значение коэффициента меняется от 0 до 1 в зависимости от климатической зоны. Величина зависит от рода поверхности, рельефа местности, интенсивности дождя и его продолжительности. Коэффициент стока весеннего половодья рассчитывается отношением слоя стока весеннего половодья к стокоформирующим осадкам: $K_{\Pi} = h_{\text{мм}} / X_{\text{сф}}$. За 60-ти летний период K_{Π} изменяется от 0,28 — 0,70.

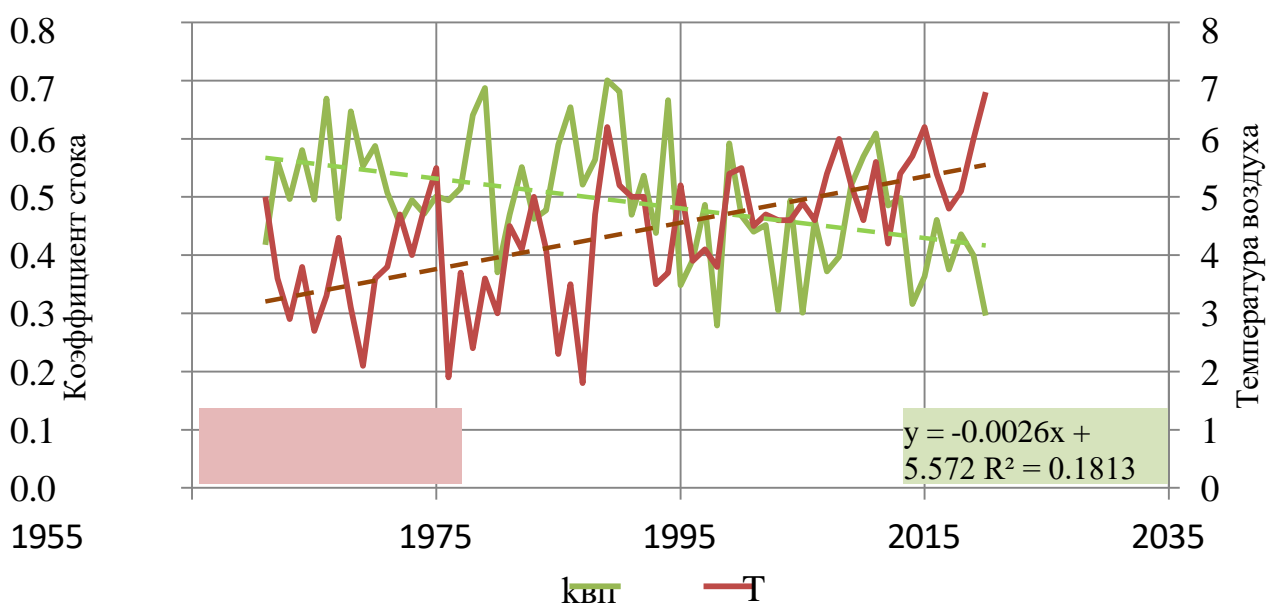


Рисунок 7 – Хронологический график коэффициента стока и температуры воздуха

3.4. Расчёт потерь стока (их динамика)

Для оценки потерь был произведён расчёт по разности стокоформирующих осадков и слою стока весеннего половодья $H_{\text{пот}} = X_{\text{сф}} - Y_{\text{вп}}$. Отмечается тенденция к увеличению потерь и температуры воздуха (рис.8).

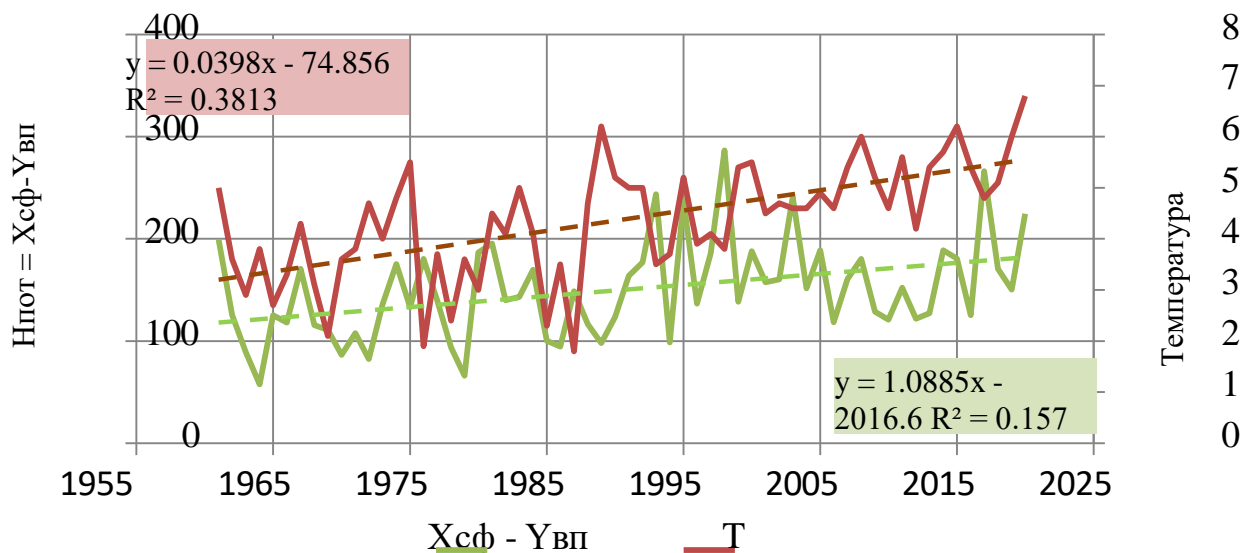


Рисунок 8 – Хронологический график потерь $X_{\text{сф}} - Y_{\text{вп}}$ и температуры воздуха

Зависимость порядкового номера дня начала половодья с порядковым номером дня устойчивого перехода температуры через 0° весной к теплomu периоду показывают надёжную корреляционную связь ($R=0,7$).

3.5. Оценка динамики испарения и уровней грунтовых вод

Слой стока весеннего половодья формируют именно стокоформирующие осадки. Потому что сумма годовых осадков росла, а слой стока весеннего половодья уменьшался. Осадки стокоформирующие уменьшаются не так интенсивно. Потери растут, в это время уровень грунтовых вод уменьшается, это объясняется потерями, на фоне роста температуры.

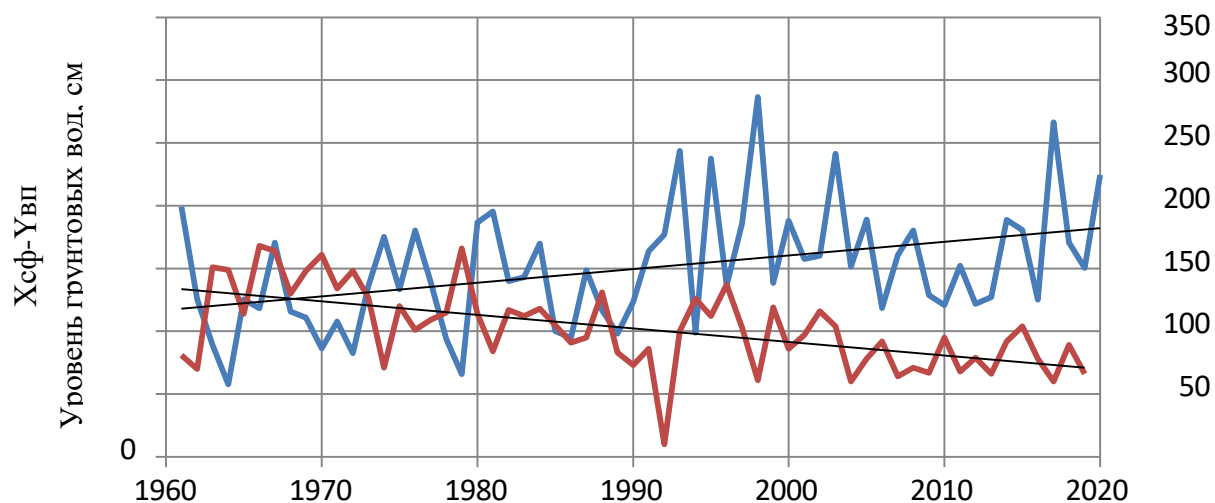


Рисунок 9 – Хронологические графики потерь и уровня грунтовых вод

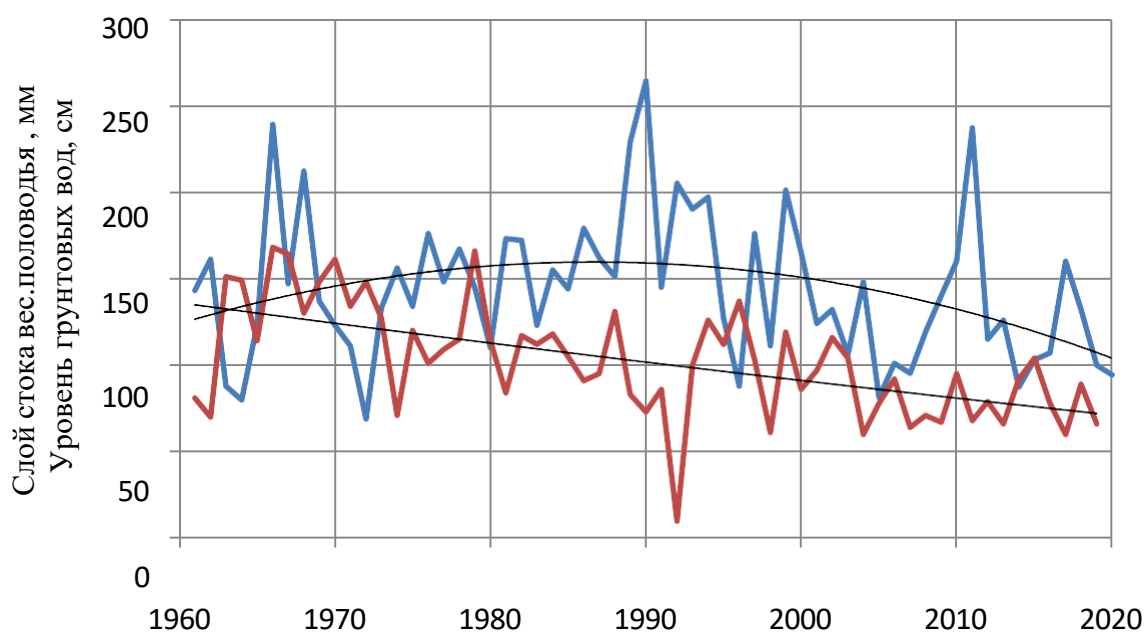


Рисунок 10 – Хронологические графики слоя стока весеннего половодья и уровня грунтовых вод

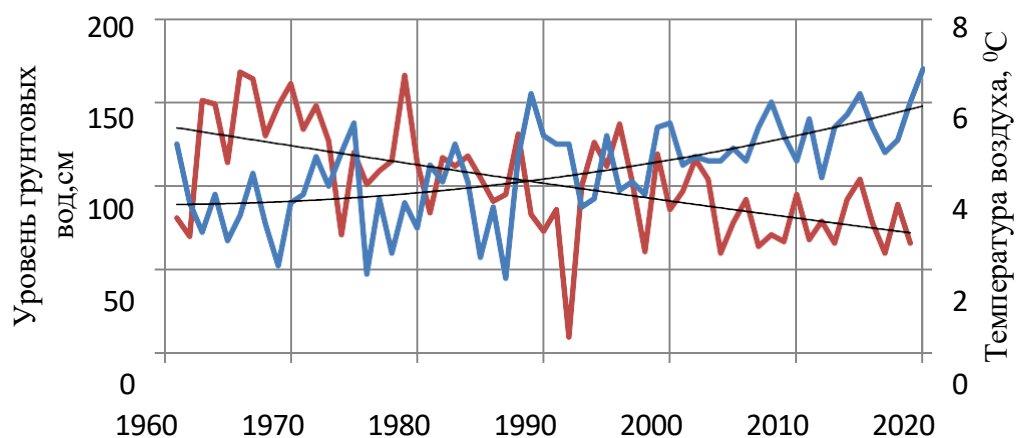


Рисунок 11 – Хронологические графики годовой температуры воздуха и уровня грунтовых вод

Для анализа испарения использовались средние годовые данные по почвенным испарителям ГГИ-500-50, использовавшие в разные интервалы времени в количестве от 3 до 14 шт. в тёплый период года.

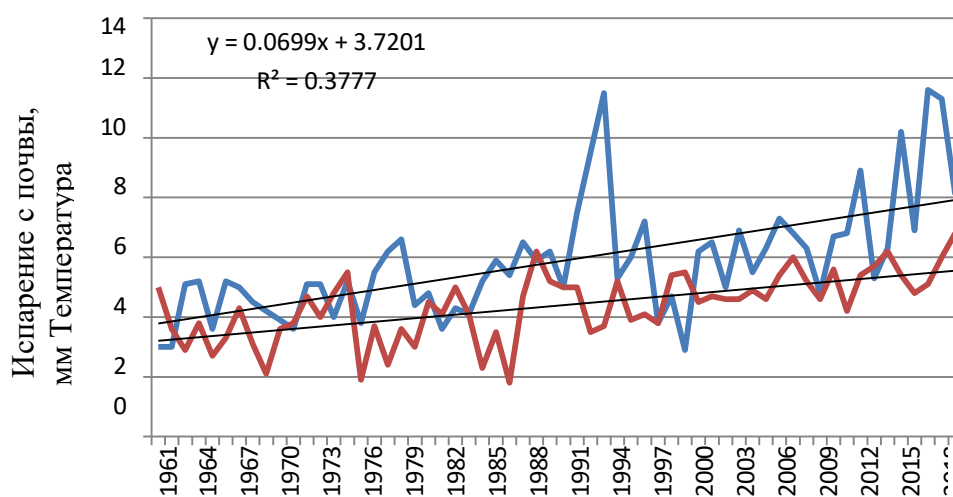


Рисунок 12 – Хронологические графики годовой температуры воздуха и испарения с почвы

3.6. Статистическая проверка слоя стока весеннего половодья

Слой стока первого климатического периода имеют положительный тренд на повышение, а слой стока второго климатического периода имеют обратную тенденцию. Проверка рядов на однородность по критериям Фишера и Стьюдента доказала однородность рядов т.к. условие выполняется, и гипотеза об однородности не опровергается. Рассматриваемый ряд стока весеннего половодья за период с 1961-2020 гг., продолжительностью 60 лет является однородным по критерию Фишера и Стьюдента.

Таблица 5 – Результат проверки на однородность слоев весеннего половодья

№ п/п	Река, пункт	n	F^*	$F_{2\alpha 5\%}$	$F^* < F_{2\alpha}$	t^*	$T_{2\alpha 5\%}$	$ t^* < t_{2\alpha}$
1	р.Полометь – с.Яжелбицы	60	1,08	2,07	-	1,00	2,04	-

«-» - (условие выполняется) нулевая гипотеза не опровергается

«+» - нулевая гипотеза опровергается

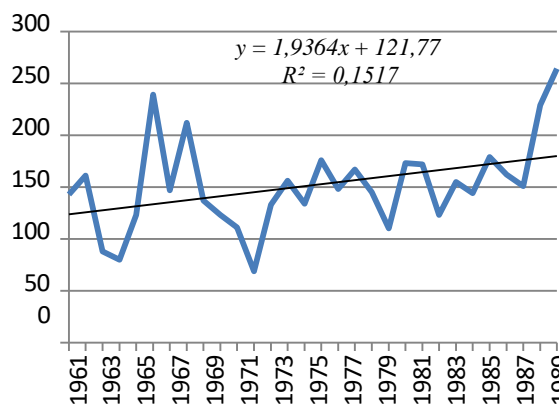


Рисунок 13 – Слой стока весеннего половодья за период с 1961-1990 гг.

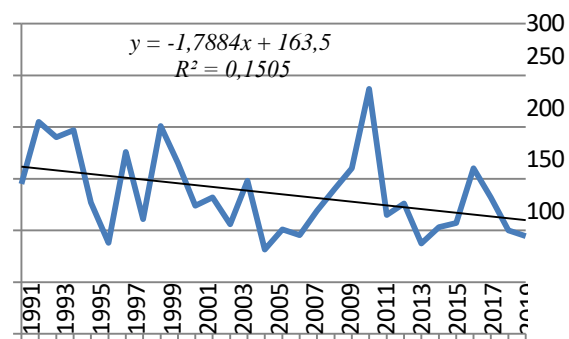


Рисунок 14 – Слой стока весеннего половодья за период с 1991-2020 гг.

Физика процесса формирования слоя стока весеннего половодья характеризуется уровнем грунтовых вод, стокоформирующими осадками, осадков за холодный период и осадков за теплый период, испарением с почвы, температурой воздуха.

Слой стока весеннего половодья первого климатического периода с 1961-1990 гг. увеличивался. При анализе слоя стока весеннего половодья второго климатического периода с 1991-2020 гг. слои стока имеют обратную тенденцию на уменьшение, и это связано главным образом с увеличением температуры воздуха. Уменьшается слой стока и соответственно коэффициент стока имеет такую же тенденцию. Мы выяснили, что слой стока формируют главным образом стокоформирующие осадки, в то время как их период сокращается. Слои стока за период года, исключая весеннее половодье имеют обратную тенденцию на увеличение.

При проверке на однородность по критериям Фишера и Стьюдента слои стока весеннего половодья за период с 1961-2020 гг. являются однородными. Гипотеза об однородности не опровергается.

3.7 Сценарная оценка стока

Математическую модель можно записать в общем виде [1]: $L(Y(A)) = \xi$, где L – оператор; ξ , A , Y – вектора внешних воздействий, задаваемых параметров и состояния системы соответственно. Пусть $\xi = X$, $A = (k, \tau)$, $Y = Q$, $L = \tau d / dt + 1/k$. Тогда переходим к модели водосбора.

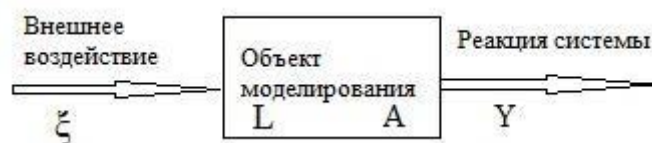


Рисунок 15 – Общий вид математической модели

Для корректности решения любой модели необходимо, чтобы решение существовало, было единственным и непрерывно зависело от задаваемой информации. Это обеспечивается заданием начальных и граничных условий и выбором (при численной реализации модели) шагов интегрирования (прогнозирования), согласованных в каком-то смысле со свойствами объекта моделирования.

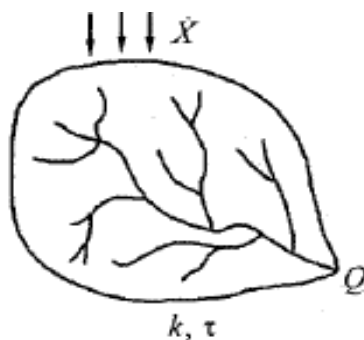


Рисунок 16 – Модель формирования речного стока с сосредоточенными параметрами

Генетическая модель формирования стока, дающая решение в виде кривых плотности вероятности, эволюционирующих во времени:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau}Q + \frac{X}{\tau}$$

где k – коэффициент стока, τ – время релаксации речного бассейна. Введя белые шумы $1/k\tau = c = c$, $X/\tau = N = N + N$ (с интенсивностями G_s , G_n , G_{en}), получаем стохастическую модель линейного формирующего фильтра, преобразующего случайный процесс осадков в марковскую последовательность расходов в замыкающем створе бассейна. Этой модели статистически эквивалентно уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(Ap) + 0,5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(Bp)$$

Уравнение ФПК описывает эволюцию кривой плотности вероятности за счёт коэффициентов сноса (A) и диффузии (B).

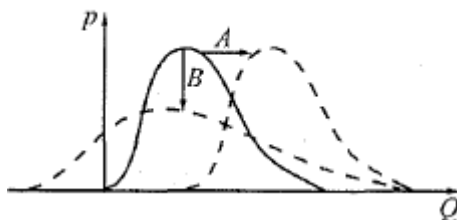


Рисунок 17 – Условная иллюстрация действия коэффициента сноса (A) и диффузии (B)

Коэффициенты сноса $A(Q, t)$ и диффузии $B(Q, t)$ выражаются формулами:

$$A(Q, t) = -(c - 0,5G_s)Q - 0,5G_{cN} + N,$$

$$B(Q, t) = G_s Q^2 - G_{cN} Q + G_{NN},$$

где G_s , G_N , и G_{cN} – интенсивности и взаимная интенсивность шумов, а c и N – математические ожидания (они могут быть функциями времени).

В основе решения задачи об оценке долгосрочных изменений расчётных характеристик многолетнего речного стока в результате климатических

вариаций лежит уравнение ФПК. Основным аргументом в пользу этой модели является то обстоятельство, что для стационарных случайных процессов она переходит в уравнение Пирсона:

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2} p,$$

решением которого является семейство распределений, взятых на вооружение инженерной гидрологией (Пирсона III типа и ее модификации, сделанной С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем для частного случая $p(Q = 0) = 0$). Изначально это уравнение не имело отношения к гидрологии, оно было предложено для аппроксимации эмпирических распределений без всякой связи с уравнением ФПК. Коэффициенты a , b_0 , b_1 , b_2 до настоящего времени рассматриваются в гидрологии как «подгоночные», чтобы аналитическая кривая $p(Q)$ лучше всего соответствовала эмпирическим точкам. Ситуация кардинально меняется при подходе к уравнению (Пирсона) со стороны уравнения ФПК: коэффициенты связываются формулами с параметрами s , N , G_c, G_N, G_{cN} [2] и приобретают физический (а не «подгоночный») смысл. Это открывает возможность рассматривать уравнение как генетическую модель формирования стока, а решение $p(Q)$ уравнения Пирсона с физически обоснованными коэффициентами a , b_0 , b_1 , b_2 – как теоретическое распределение, с которым согласуется или не согласуется эмпирический набор точек. Важным является то, что можно, меняя факторы формирования стока (климатические или подстилающей поверхности бассейнов) через параметры s и N , т. е. через осадки и величины, влияющие на коэффициент стока k , оценивать чувствительность к подобным изменениям кривой плотности вероятности.

Так как в практической гидрологии из-за коротких рядов наблюдений ограничиваются 3–4 моментами вероятностных распределений, то имеет смысл аппроксимировать системой алгебраических уравнений для моментов m_i :

$$\begin{aligned} 0 &= -(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})m_1 - 0,5G_{\bar{c}\bar{N}} + \bar{N}; \\ 0 &= -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\bar{c}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}}; \\ 0 &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\bar{c}\bar{N}}m_2 + 3G_{\bar{N}}m_1; \\ 0 &= -4(\bar{c} - 2G_{\bar{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\bar{c}\bar{N}}m_3 + 6G_{\bar{N}}m_2. \end{aligned}$$

Этой системы уравнений достаточно для определения всех расчётных гидрологических характеристик: нормы $Q=m_1$, коэффициентов вариации $Cv=f(m_1, m_2)$ и асимметрии $Cs=f(m_1, m_2, m_3)$, а также эксцесса $Eh=f(m_1, m_2, m_3, m_4)$

Решение задачи разбивается на два этапа [2]: по имеющимся норме стока, коэффициентам вариации и асимметрии (из данных наблюдений или карт) находим значения моментов m_i и по ним выполняем идентификацию параметров модели, т. е. вычисляем c , G_c , G_N , G_{cN} , а затем, меняя в соответствии с климатическим сценарием значения $c(X, T)$ и $N(X)$, находим прогнозные (точнее сценарные) значения моментов m_i^{np} . По ним вычисляем прогнозные расчётные распределения $p^{np}(Q)$ и находим обеспеченные значения $Q_{P\%}^{np}$, отличающиеся от фактических с учетом климатических изменений.

Заключение

Проанализировав результаты данной выпускной квалификационной работы, можно сделать следующие выводы:

1. Были собраны и проанализированы данные физико-географических особенностей бассейна реки Полометь.
2. Были собраны и проанализированы многолетние метеорологические и гидрологические данные по реке Полометь

За климатические периоды выявлены изменения, в частности повышение температуры воздуха на $1,2^{\circ}\text{C}$ и увеличение осадков на 90 мм по сравнению с базовым периодом.

За рассмотренные периоды осредненная продолжительность теплого периода увеличилась на 12 дней, соответственно холодного – сократилась. Суммы температур, как интегральный показатель, за теплые и холодные периоды также увеличились на 9 и 25 % соответственно, что характеризует потепление в зимний период более интенсивным.

При оценке стока на регулируемое водохранилище, мы взяли реку Полометь – створ Яжелбицы и сделали сценарную оценку изменения годового стока на период с 2021-2050гг. и 2051-2080гг. на перспективу. Выявлено дальнейшее увеличение температуры воздуха до $6,7^{\circ}\text{C}$ и $7,2^{\circ}$ соответственно новым 30-летним климатическим периодам. Осадки тоже будут увеличиваться до 842 мм и 854 мм соответственно новым периодам.

Провели исследование весеннего половодья, где самый большой сток и выявили его уменьшение, также уменьшаются влагозапасы (уровней грунтовых вод), а испарение с почвы увеличивается. Определили устойчивые переходы температуры воздуха через 0 весной и осенью и вычислили стокоформирующие осадки, а также коэффициент стока, который имеет тенденцию к уменьшению.

3. Были произведены попытки численного решения уравнения ФПК

Список литературы

1. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В. Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть I. Динамические модели» (на базе языка C++) [Текст], ; РГГМУ. - Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2010. - 95 с.
2. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Практикум по дисциплине "Моделирование гидрологических процессов" : учебное пособие. Ч. 2. Стохастические модели (на базе языка C++) [Текст], ; РГГМУ. - Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2012. - 246 с.
3. Кузнецов В.И., Голубев В.С., Федорова Т.Г. Указания по расчёту испарения с поверхности водоёмов. ВНИГЛ ГГИ. Авт. Л. 1969 – 85с.
4. Малаховский Д.Б., Хантулев А.А., Филенко Р.А. Природное районирование Новгородской области/Под. ред. Н.В. Разумихина. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1978, 245с Авт.:
5. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: изд.РГГМУ, 2007. – 279с.
6. Хаустов В.А., Ромашова К.В., Хренов А.А. Оценка многолетних изменений максимальных снегозапасов и водоотдачи северного края России. – Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции, 2019. – с.294-296.
7. <https://www.meteorf.gov.ru/> Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Росгидромет
8. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. 2-е изд. испр. и доп. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с. (1-е изд.: Коваленко В. В. Моделирование гидрологических процессов. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 256 с.).
9. Виноградов В. Ю., Клавен Т. Г. Гидрологический режим малых рек Валдайской возвышенности. – СПб.; Гидрометиздат, 2010. – 180 с.
10. Государственный водный реестр РФ. Паспорт водного объекта «Река Полометь». – Москва: Росводресурсы, 2023.
11. Климатический справочник России, выпуск 6 (Северо-Запад). – Санкт-Петербург: Росгидромет, 2022г.
12. Догановский А.М. Гидрология суши (общий курс). – СПб.: РГГМУ, 2012. – 524 с.

13. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы. – СПб.: РГГМУ, 2007. – 177 с.