

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Государственный гидрологический институт»

УДК 556.047, 556.535

На правах рукописи

Грек Елена Николаевна

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ НА  
МАЛЫХ И СРЕДНИХ РЕКАХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ**

Специальность: 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении Государственном гидрологическом институте (ФГБУ «ГГИ»)

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| <b>Научный руководитель:</b>  | <b>Журавлев Сергей Александрович</b><br><i>кандидат географических наук</i><br>ФГБУ «ГГИ» |
| <b>Официальные оппоненты:</b> |   |
| <b>Ведущая организация:</b>   |   |

Защита состоится «??» месяц 2022 года в ?? часов на заседании диссертационного совета .....  
при .... По адресу .....

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте .... (ссылка на сайт), а также на сайте  
ВАК (ссылка на сайт).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу:

....

Автореферат разослан «??» месяц 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Современные климатические изменения влияют на основные механизмы формирования стока и сопровождаются его внутригодовым перераспределением.

На большей части территории России к основным причинам возникновения опасных гидрологических явлений относят, как правило, высокие весенние половодья, обусловленные интенсивным таянием снежного покрова при значительных запасах воды в нём. Однако многочисленные случаи высоких дождевых паводков, отмеченные в последние годы в различных регионах страны (Крым, 2021; Иркутская область, 2019; Новгородская область, 2019; Забайкальский край, 2018; Краснодарский край, г. Крымск, 2012), в том числе на реках Северо-Запада России (Новгородская область: р. Холова, р. Городня, 2017; р. Холова, 2019; р. Явонь, 2021; Ленинградская область: р. Воложба, 2017), свидетельствуют о необходимости актуализации сведений об основных факторах возникновения опасных и неблагоприятных гидрологических явлений в этом регионе и требуют более детальных исследований пространственно-временной изменчивости дождевых паводков на региональном уровне.

Повышение частоты возникновения экстремальных дождевых паводков подтверждает современные представления о происходящем изменении структуры выпадения осадков и указывает на вероятное повышение рисков, связанных с возможным недоучетом дождевых паводков при гидрологических расчетах, прогнозировании и обосновании водохозяйственных мероприятий в будущем. В связи с этим в настоящее время особый интерес представляет разработка методов расчетов и моделирования дождевых паводков с использованием новых видов информации, получаемых с метеорологической радиолокационной сети и сети автоматических осадкомеров. Высокая пространственная и временная дискретность наблюдений таких сетей в совокупности с современными методами обработки информации способна повысить потенциал методов гидрологических расчетов и прогнозов в целях своевременного оповещения населения и органов власти, повышения эффективности работы транспортной инфраструктуры, систем водоотведения, водохранилищ.

Диссертация посвящена оценке современных изменений максимального стока дождевых паводков и выявлению причин, их обуславливающих, для территории южной части бассейна р. Невы, включая бассейны рек Волхов и Великой. **Целью** исследования является выявление особенностей пространственно–временной изменчивости дождевых паводков для указанного региона и оценка возможности применения радиолокационной информации об осадках для повышения надежности моделирования дождевых паводков.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- анализ современных изменений характеристик атмосферных осадков и дождевого стока исследуемой территории;
- оценка параметров уравнения  $ZR$ –отношения радиолокационного метода определения осадков по данным наземных измерений осадков для доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ–С «Валдай»;
- моделирование дождевого стока с использованием входной метеорологической информации с различной детализацией и соответствующий анализ чувствительности модели;
- оценка возможности применения радиолокационных и комбинированных данных для информационного насыщения гидрологических моделей.

**Объект и предмет исследования.** Объекты исследования — малые и средние реки территории южной части бассейна р. Невы, включая бассейны рек Волхов и Великой. Моделирование стока выполнялось для речных водосборов Валдайской возвышенности. Предмет исследования — характеристики атмосферных осадков и паводочного стока рек.

**Методы исследования.** В работе применялись методы статистического анализа гидрологических рядов, традиционно используемые в гидрологии для обработки и анализа наблюдаемых рядов стока и выявления трендов, методы комплексирования разнородной гидрометеорологической информации, гидрологического моделирования, пространственного обобщения расчетных гидрометеорологических характеристик с использованием геоинформационных технологий.

**Научная новизна** состоит в следующем:

- впервые для района исследований выявлены особенности пространственно–временной изменчивости, в том числе многолетних изменений, характеристик атмосферных осадков на различных интервалах времени;
- выявлены тенденции и определены причины изменений характеристик паводочного стока исследуемой территории;
- апробирован подход к моделированию дождевых паводков, основанный на комбинировании различных источников информации об атмосферных осадках, включая радиолокационные данные Валдайского локатора ДМРЛ–С и данные экспериментальных наблюдений Валдайского филиала ГГИ, на примере реки Полометь в Новгородской области.

**Практическая значимость работы.** Результаты исследований позволили выявить особенности характеристик дождевых паводков, которые следует учитывать при разработке методов гидрологических расчетов и краткосрочных гидрологических прогнозов в целях повышения надежности защиты населения и хозяйственных объектов от наводнений, вызванных дождевыми паводками для наиболее подверженных регионов РФ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ многолетних характеристик атмосферных осадков показал, что рост сезонной суммы осадков с мая по октябрь (в среднем 10 мм / 10 лет) на всей территории исследования совместно с увеличением интенсивности выпадения осадков (до 0,13 мм/мин / 10 лет) приводит к увеличению роли дождевого стока и повышению рисков опасных гидрологических явлений, вызванных дождевыми паводками;
2. На большинстве рек исследуемого региона выявлена положительная динамика максимальных расходов воды дождевых паводков;
3. Частота превышения максимальных расходов дождевых паводков над соответствующими расходами воды весенних половодий для района исследований повышается как на малых, так и на средних реках. Изменяется соотношение их расчетных величин 1% вероятности превышения. Это обусловлено одновременным снижением стока весеннего половодья и увеличением максимальных расходов дождевых паводков;
4. Наилучшая сходимость радиолокационных и наземных данных об осадках обеспечивается при использовании эмпирически подобранных параметров  $A$  и  $b$  в уравнении  $ZR$ -отношения;
5. Современные региональные и глобальные сеточные архивы речного стока (реанализы) не способны надежно воспроизводить дождевые паводки на малых водосборах;
6. Радиолокационные и комбинированные данные об осадках способны повысить качество моделирования дождевого стока, однако надежность результатов модельных расчетов дождевых паводков в первую очередь зависит от количества наземных пунктов измерения осадков, участвующих в процедуре калибровки самого локатора и комбинирования при расчете невязки.

**Обоснованность и достоверность результатов** подтверждается детальным анализом предшествующих исследований в области изменений речного стока, использованием большого объема данных с наблюдательной сети Росгидромета, включая материалы Валдайского филиала ГГИ, а также результатами анализа сходимости расчетных и наблюдаемых данных.

**Личный вклад автора.** Сбор и обработка гидрологических и метеорологических данных, анализ многолетних изменений атмосферных осадков и дождевого стока, выбор, настройка и адаптация модели к условиям формирования стока реки Полометь, верификация модели по данным наблюдений были произведены лично автором диссертационной работы.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации были представлены на следующих конференциях и семинарах:

Четвертая международная летняя школа «Climate of the Baltic Sea Region» (Троса, Швеция, 2018), Третья Всероссийская конференция имени Л.Н. Карлина «Гидрометеорология и Экология:

Достижения и Перспективы развития» (Санкт–Петербург, 2019), Генеральная Ассамблея Европейского Союза наук о Земле (Вена, 2020), Конференция "Четвертые Виноградовские Чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению" (Санкт–Петербург, 2020), Генеральная Ассамблея Европейского Союза наук о Земле (Вена, 2022).

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка используемых источников и 1 приложения. Общий объем работы составляет 122 страницы, работа иллюстрирована 45 рисунками и содержит 21 таблицу. Список используемых источников содержит 188 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** приводится общая характеристика работы, обосновывается её актуальность, научная новизна и практическая значимость. Сформулированы и перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор работ, посвященных изучению и оценке существующих и возможных изменений характеристик речного стока, в особенности максимального, а также атмосферных осадков. В целом характер изменений максимального стока рек нельзя считать однозначным для всей территории России. Только на небольшом числе рек наблюдается повышение частоты появления максимальных расходов воды малой обеспеченности ( $P < 10 \%$ ). В исследованиях, посвященных изменениям режима выпадения атмосферных осадков, отмечается увеличение интенсивности экстремальных осадков, а также длительности влажных периодов, что увеличивает риск возникновения наводнений. Наибольшее количество исследований максимального стока территории Европейской части России касается анализа динамики максимальных расходов воды весеннего половодья, так как для большинства рек данной территории до недавнего времени было характерно формирование максимальных расходов воды в первую очередь вследствие интенсивного снеготаяния. Так, в последние десятилетия для большинства рек европейской территории России и рек Восточной Европы наблюдается устойчивое снижение максимальных расходов воды весеннего половодья.

В главе также рассмотрены предшествующие работы, посвященные оценке влияния метеорологической информации и, прежде всего, атмосферных осадков, на результаты гидрологического моделирования. Далее в диссертации обобщен опыт использования радиолокационных данных для гидрологических целей, в том числе для моделирования дождевых паводков. Особое внимание уделено результатам, полученным на территории

Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории с применением данных первых метеорологических радиолокаторов. Кроме этого, представлено краткое описание и основные характеристики современных реанализов, часто используемых в различных областях наук о Земле.

Во **второй главе** приводится физико-географическое описание района исследований, представлены методы и результаты анализа многолетних изменений атмосферных осадков и дождевого стока.

Представлены оценки надежности данных реанализов и локатора ДМРЛ-С на основе их сравнения с наземными наблюдениями, а также анализ многолетней динамики осадков.

Результаты сопоставления показали, что данные глобального реанализа не способны воспроизводить часовую и суточную изменчивость жидких осадков. Установлено, что реанализ ERA5 более качественно воспроизводит сезонную сумму осадков, но с систематическим завышением по отношению к фактическим наблюдениям на 5 – 10 %.

В результате сравнения радиолокационных и наземных данных выявлено, что большое влияние на надежность определения осадков оказывают значения параметров уравнения  $ZR$ –отношения и расстояние от осадкомера до локатора. Так, для эмпирически подобранных параметров  $A$  и  $b$  радиолокационного метода расчета осадков выявлена наилучшая сходимость с наземными данными, которая характеризуется наибольшими значениями коэффициента детерминации и наименьшими значениями среднеквадратичной ошибки как для суточных, так и для часовых сумм осадков. Однако локаторные данные, осредненные для сезонов, характеризуются заниженными суммами осадков по отношению к наземным на 10 – 15 %, и точность этих данных падает по мере удаления от локатора.

Оценка возможности использования современных реанализов для определения характеристик максимального дождевого стока, выполненная на основе данных глобального GloFAS–ERA5 и регионального реанализа речного стока R5 по независимым данным с пяти водосборов в бассейне р. Полометь, показала, что реанализы обеспечивают удовлетворительную сходимость с наблюдаемыми данными только для водосборов с площадью более 2000 км<sup>2</sup>, а наиболее точные результаты отмечаются по данным регионального реанализа.

Анализ рядов характеристик атмосферных осадков по 26 метеорологическим станциям и постам за период 1966 по 2019 гг. позволил выявить, что на территории исследования в целом наблюдается тенденция к росту слоя атмосферных осадков. По результатам оценки существенных изменений в рядах суточного максимума не выявлено, и для большей части территории, за исключением юго-восточной части бассейна Невы, они находятся в пределах естественной изменчивости (рисунок 1а).

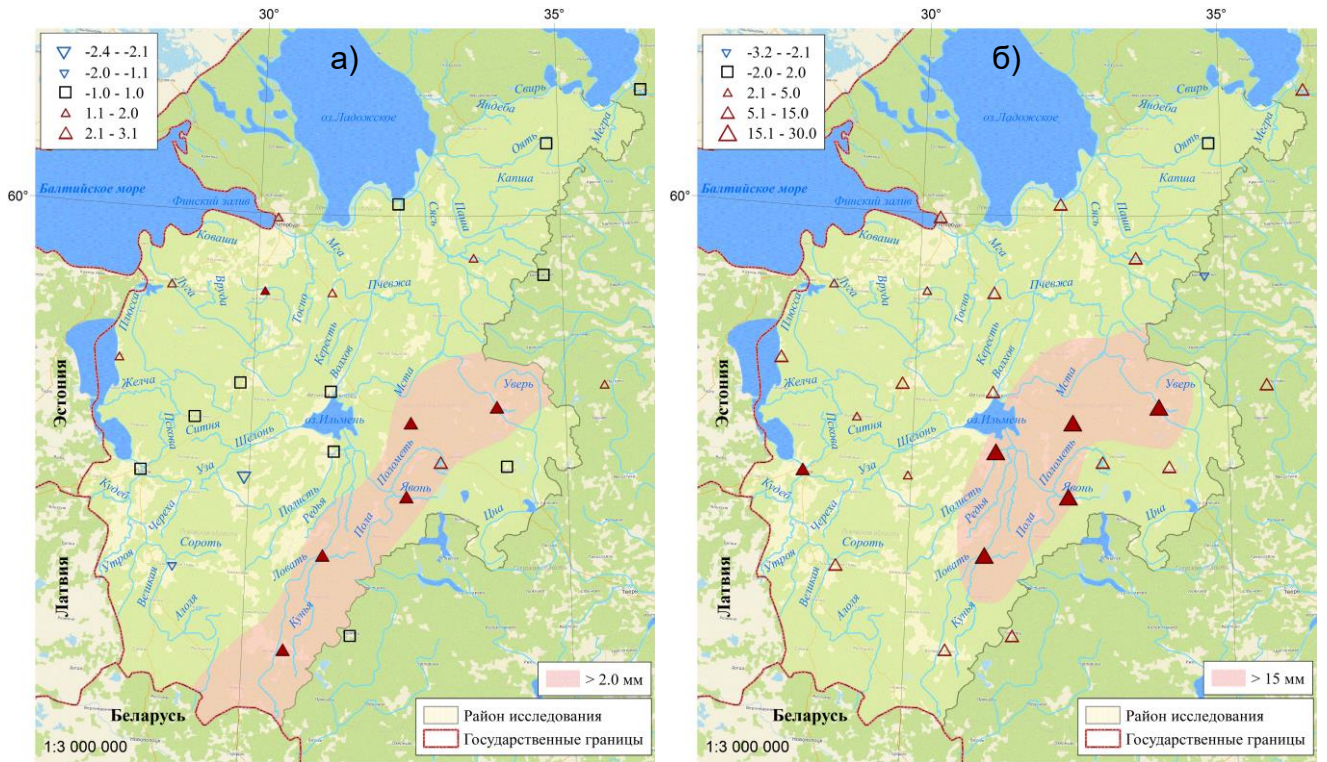


Рисунок 1 – Линейные тренды а) суточного максимума и б) суммы осадков за теплый период (май–октябрь) за 1966 – 2019 гг, мм / 10 лет. Залيفкой выделены станции/посты со значимым трендом ( $\alpha = 0,05$ )

Изменения наблюдаются в рядах сумм осадков за теплый сезон (в среднем 10 мм / 10 лет) в целом по всей территории исследования (рисунок 1б), наиболее значительные — в районе Валдайской возвышенности (более 15 мм / 10 лет для сумм осадков за теплый период), где выявлены положительные значимые ( $\alpha = 0,05$ ) тренды (рисунок 2).

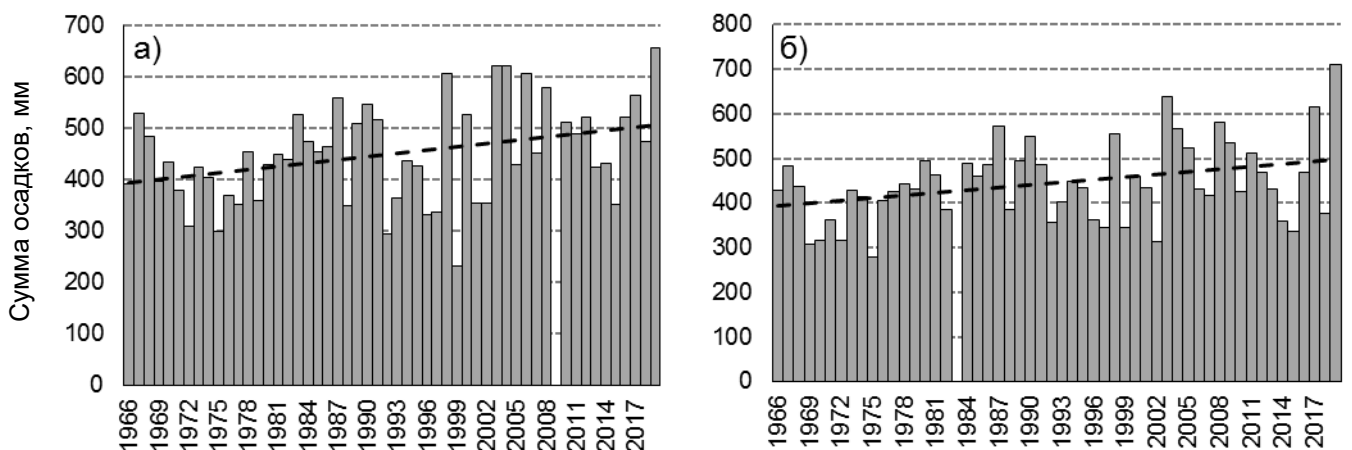


Рисунок 2 – Хронологические графики сезонных (май–октябрь) сумм осадков, мм метеорологических станций а) Крестцы и б) Демянск с выявленными значимыми трендами

Для оценки изменений структуры выпадения дождевых осадков были проанализированы суммы осадков по данным плувиографов за короткие интервалы времени за период с 1966 по



2019 г. Полученные результаты в целом характеризуют наличие неоднородности в происходящих изменениях внутри рассматриваемых интервалов времени (рисунок 3).

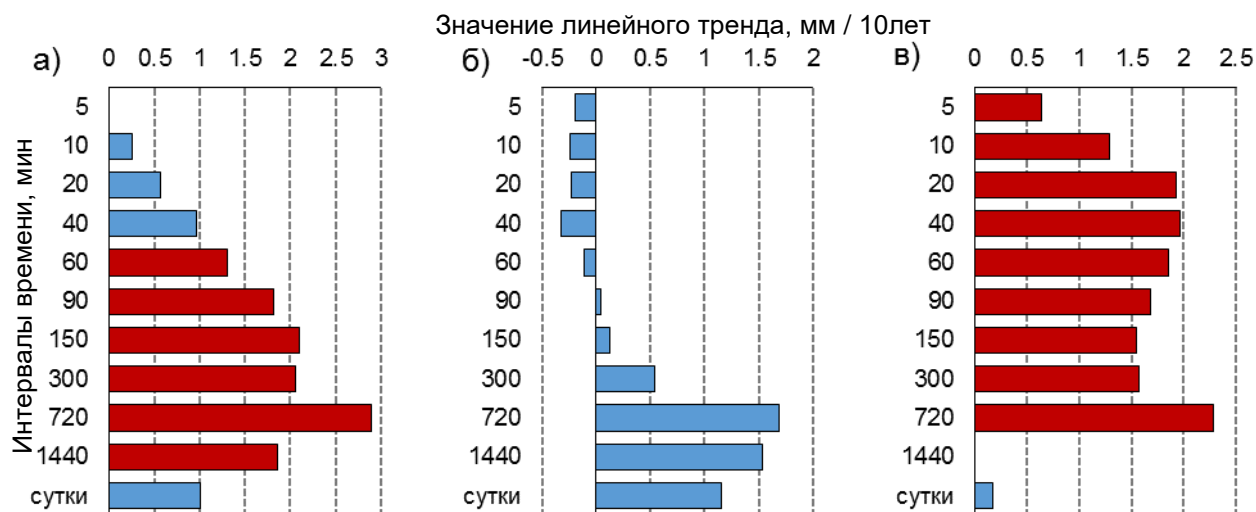


Рисунок 3 – Линейные тренды слоя осадков за короткие интервалы времени на метеорологических постах: а) Валдай, б) Санкт–Петербург и в) Новая Ладога, мм / 10 лет. Красной заливкой выделены значения со значимым трендом ( $\alpha = 0,05$ )

Так, на интервале продолжительностью менее 90 минут наблюдаются как отрицательные, так и положительные тренды. Наиболее высокие коэффициенты линейного тренда отмечены на всех метеостанциях на интервалах времени продолжительностью от 150 до 720 мин. На двух станциях (Валдай и Новая Ладога) положительные тренды наблюдаются для всех периодов времени.

В **третьем разделе** приводятся результаты оценки современных изменений максимального стока дождевых паводков. Анализ трендов максимальных расходов воды выполнен по 53 гидрологическим постам за период 1966 – 2019 гг. Выявлено наличие положительного тренда максимальных расходов воды дождевых паводков у 70 % постов, при этом для 19 % тренд является статистически значимым. В среднем для района исследования линейный тренд составляет 5,7 % / 10 лет. Сопоставление максимумов дождевых паводков и весенних половодий показал, что с конца 1980–х годов отмечается резкое увеличение числа случаев превышения максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья соответствующего года (рисунок 4 – б).

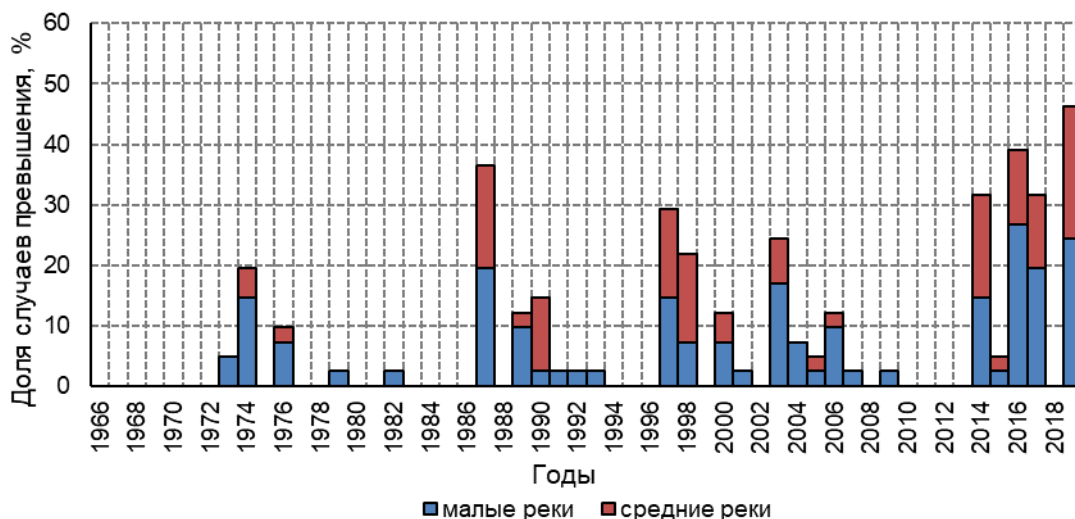


Рисунок 4 – Число случаев превышения максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья за период с 1966 по 2019 гг.

Было выявлено, что максимальные расходы воды паводков могут превышать максимальные расходы воды половодий на всех реках района исследования (рисунок 5). На реках в бассейне Невы такие случаи единичны, для притоков Псковско–Чудского озера — довольно часты.

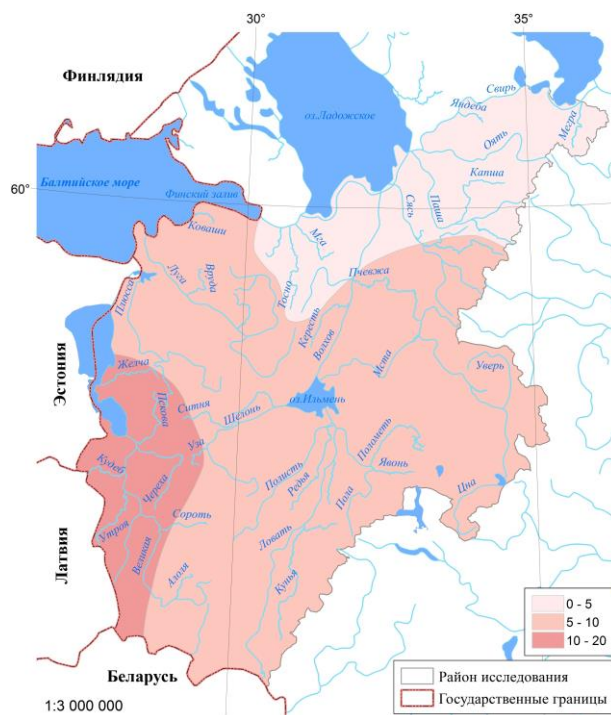


Рисунок 5 – Доля случаев (%) превышения максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья на реках района исследования за период с 1966 по 2019 гг.

Помимо повышения частоты превышения паводков над половодьями, произошел и существенный рост величины соотношения максимальных расходов воды дождевых паводков и

весенних половодий 1 %-ной обеспеченности. Данная тенденция объясняется не только увеличением дождевого стока, но и одновременным снижением максимального стока за период с 1946 по 2013 г. на большинстве рек европейской территории России (20 – 40%), где максимальные расходы воды формируются в период весеннего половодья. Основным фактором снижения максимального стока половодья, предположительно, является увеличение доли жидких осадков на фоне более частых оттепелей в зимний период. На рисунке 6 приведены хронологические графики максимальных модулей воды дождевых паводков и весеннего половодья, описывающие текущую тенденцию максимального стока рек Северо-Запада.

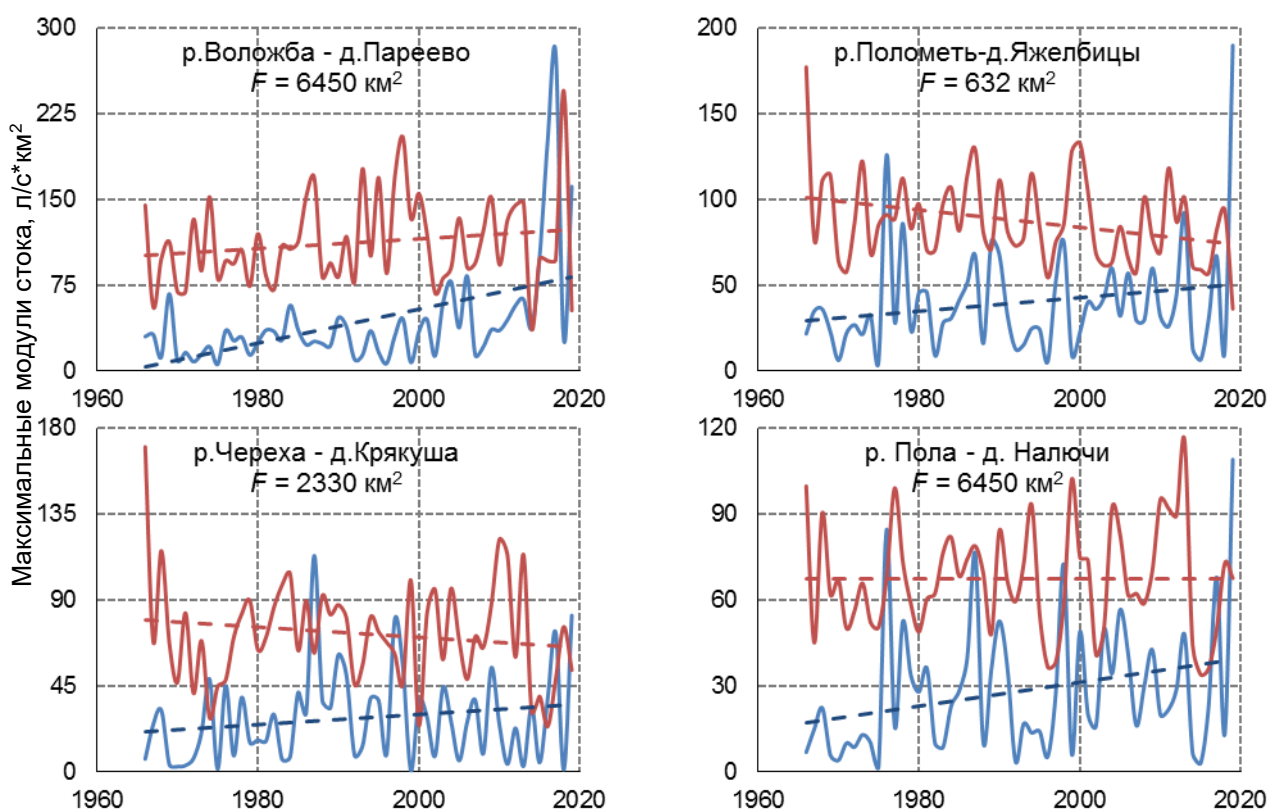


Рисунок 6 – Максимальные модули ( $\text{л/с}\cdot\text{км}^2$ ) дождевых паводков (синий) и весеннего половодья (красный), за период 1966 – 2019 гг. и их линейные тренды

В **третьей главе** описывается подход к моделированию гидрологического режима с использованием различных типов данных об атмосферных осадках на примере бассейна р. Полометь. Первый, второй и третий разделы главы посвящены, соответственно, описанию модели Soil and Water Assessment Tools (SWAT), объекту моделирования и исходным данным.

Выбор бассейна р. Полометь в качестве объекта моделирования был обусловлен тем, что данный бассейн хорошо освещен всеми необходимыми гидрологическими и метеорологическими наблюдениями за счет многолетних исследований и мониторинга, осуществляемых Валдайским филиалом ГГИ.

Перед началом работы с моделью был подготовлен ГИС-проект покрытий подстилающей поверхности водосбора (цифровая модель рельефа, сведения о почвенном покрове, типы землепользования и растительного покрова, соответствующие требованиям модели SWAT), определены основные параметры соответствующих блоков с указанием источников данных.

В данном исследовании для моделирования использовались значения суточного и часового количества атмосферных осадков, полученные от наземных наблюдений (осадкомеры, плювиограф) и оцененные по радиолокационным наблюдениям ДМРЛ-С «Валдай».

В качестве контрольной гидрологической информации использовались данные о суточных расходах воды гидрологических постов бассейна р. Полометь за период с 1994 по 2020 гг.:

- р. Лонница – д. Мосолино (площадь водосбора – 48,3 км<sup>2</sup>);
- р. Полометь – д. Дворец (площадь водосбора – 432 км<sup>2</sup>);
- р. Полометь – с. Яжелбицы (площадь водосбора – 631 км<sup>2</sup>);
- р. Полометь – д. Ермошкино (площадь водосбора – 1180 км<sup>2</sup>);
- р. Полометь – с. Лычково (площадь водосбора – 2180 км<sup>2</sup>).

**Четвертый раздел главы** описывает процесс и результаты калибровки, анализа чувствительности параметров и верификации модели SWAT. Моделирование проводилось за период 1991 – 2018 гг. (28 лет). Были выделены периоды «разгона» модели 1991 – 93 гг. (3 года), калибровки 1994 – 2006 гг. (13 лет) и верификации 2007 – 2018 г. (12 лет). Период “разгона” позволяет модели рассчитать значения, которые становятся начальными для интересующего периода.

Так как модель SWAT содержит большое число параметров, задействованных в процессе моделирования, был проведен анализ чувствительности 28 параметров, входящих в уравнения блоков поверхностных, почвенных и грунтовых вод, а также в уравнения образования и таяния снежного покрова. В результате было выделено 17 параметров, оказывающих наибольшее влияние на формирование речного стока на исследуемом водосборе. Параметры, участвующие в расчете грунтового стока и снеготаяния оказывают наиболее сильное влияние на результаты моделирования. Калибровка параметров модели выполнялась вручную как с помощью материалов воднобалансовой станции «Валдай», так и с помощью инструментов интерфейса ArcSWAT: сначала для небольших водосборов (р. Лонница – д. Мосолино), затем, двигаясь вниз по течению, для водосборов с большей площадью (р. Полометь – с. Лычково). Сначала определялись параметры, относящиеся к водосбору в целом, такие как температура воздуха, при которой осадки выпадают в виде снега (Sftmp) и начинается снеготаяние (Smtmp). После этого определялись параметры, относящиеся к гидрологическим расчетным единицам (HRU): номер кривой расхода при нормальном увлажнении (CN2) и максимальный слой воды в емкостях перехвата осадков (Canmx).

Оценка качества моделирования в пределах каждого расчетного года проводилась на основе следующих критериев: коэффициент Нэша–Саттклиффа (*NSE*), коэффициент Клинг–Гупта (*KGE*) и относительная погрешность средних годовых расходов воды (%).

Результаты моделирования стока для бассейна р. Полометь следует считать удовлетворительными, среднее значение критерия *NSE* по всем постам составило 0,66 (таблица 1).

Таблица 1 – Значения критериев за периоды калибровки, верификации и всего расчетного периода для постов бассейна р. Полометь

| Критерий     | Период      | р.Лонница -<br>д.Мосолино | р.Полометь -<br>д.Дворец | р.Полометь -<br>с.Яжелбицы | р.Полометь -<br>д.Ермошкино | р.Полометь -<br>с.Лычково |
|--------------|-------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| <i>NSE</i>   | калибровка  | 0,60                      | 0,65                     | 0,70                       | 0,67                        | 0,66                      |
|              | верификация | 0,55                      | 0,67                     | 0,72                       | 0,71                        | 0,61                      |
|              | весь        | 0,58                      | 0,66                     | 0,71                       | 0,69                        | 0,63                      |
| <i>KGE</i>   | калибровка  | 0,64                      | 0,74                     | 0,75                       | 0,73                        | 0,65                      |
|              | верификация | 0,51                      | 0,46                     | 0,76                       | 0,62                        | 0,62                      |
|              | весь        | 0,57                      | 0,63                     | 0,76                       | 0,68                        | 0,64                      |
| $\delta$ , % | калибровка  | 1,2                       | -2,8                     | 2,0                        | 1,7                         | 3,7                       |
|              | верификация | -31,8                     | -35,7                    | -9,8                       | -5                          | -12,5                     |
|              | весь        | -14,5                     | -17,4                    | -4,1                       | -1,3                        | -4,1                      |

Графические результаты моделирования (рисунок 7 – 11) показывают хорошую сходимость рассчитанных и наблюдаемых гидрографов по фазе и по амплитуде. Для всех постов характерно систематическое занижение максимальных расходов воды весеннего половодья, расходов летней и зимней межени, особенно предшествующие половодью, а также более плавные спады половодья по сравнению с наблюдаемыми. Наиболее вероятной причиной таких расхождений является недостаточная освещенность данными о распределении запасов воды в снежном покрове на различных участках водосбора, особенно на возвышенной части.

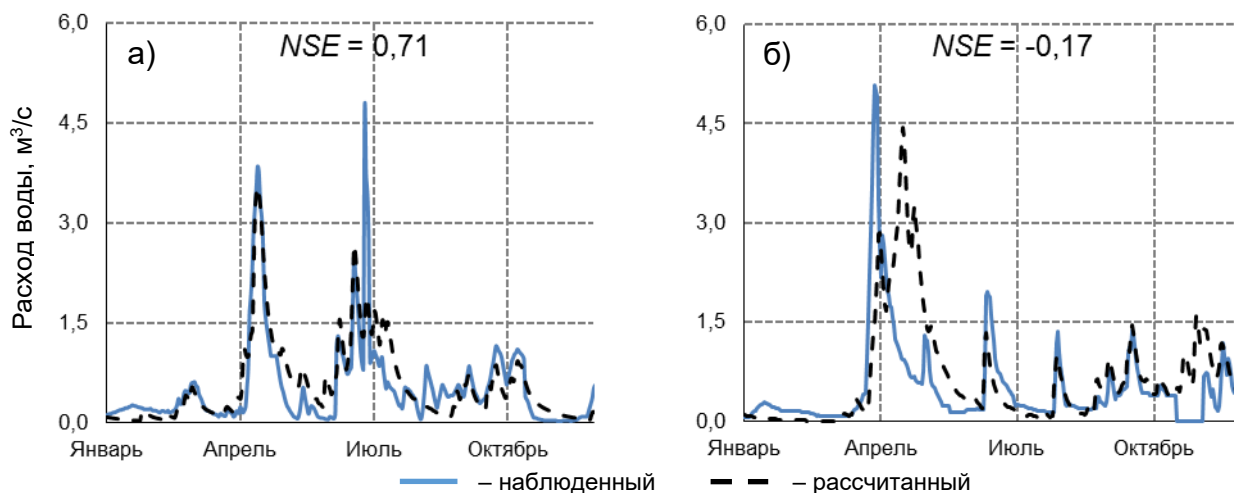


Рисунок 7 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. Лонница – д. Мосолино за а) 1998 и б) 2011 гг.

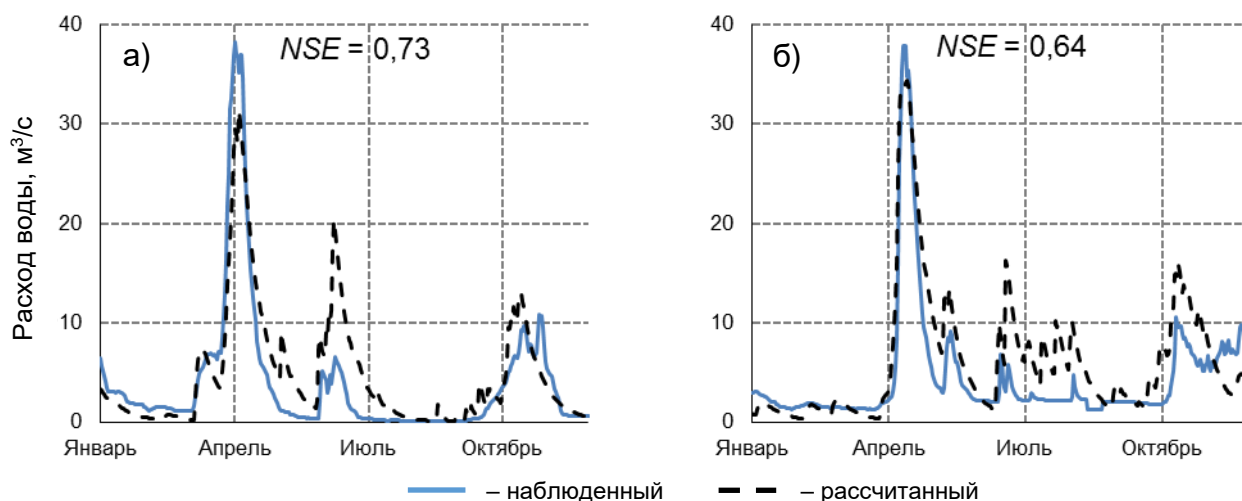


Рисунок 8 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. Полометь – д. Дворец за а) 2001 и б) 2013 гг.

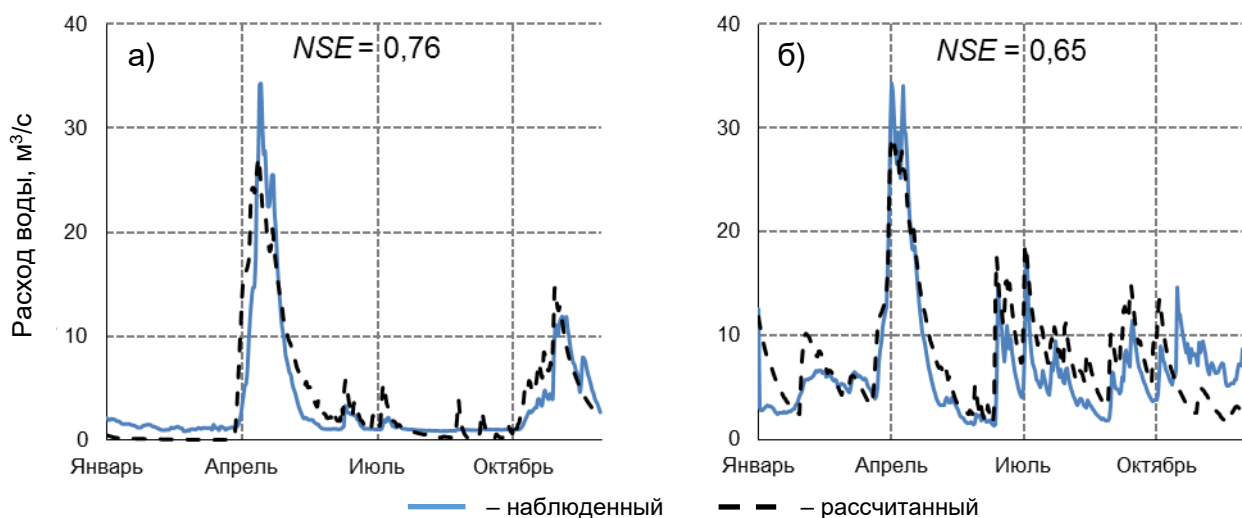


Рисунок 9 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. Полометь – с. Желбицы за а) 1996 и б) 2016 гг.

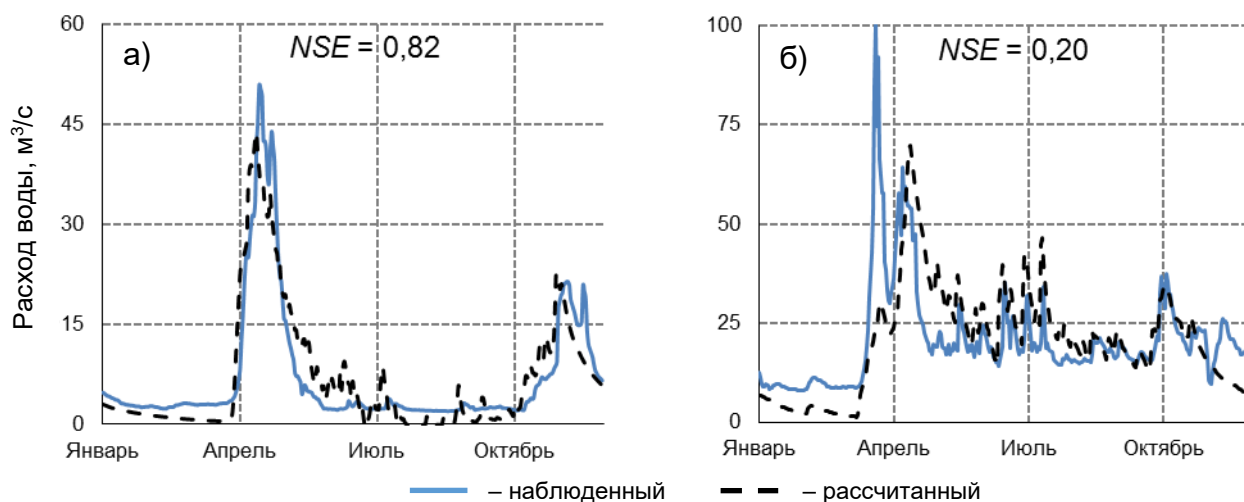


Рисунок 10 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. ПолOMETь – д. Ермошкино за а) 1996 и б) 2004 гг.

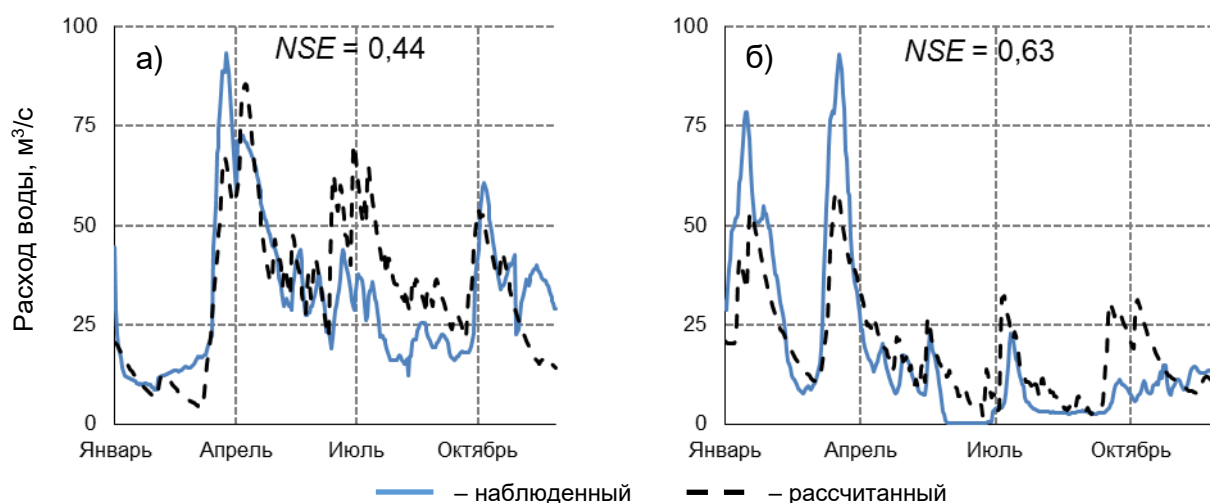


Рисунок 11 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. ПолOMETь – с. Лычково за а) 2004 и б) 2007 гг.

Неудовлетворительные значения коэффициента  $NSE$  в основном получены в случаях, где отмечены несовпадение пика и объема половодья (р. Лонница – д. Мосолино 2011 г., р. ПолOMETь – д. Ермошкино 2004 г.).

**Пятый раздел** описывает результаты моделирования дождевых паводков с использованием различных типов данных об атмосферных осадках. Оценка влияния данных об осадках на результаты моделирования стока проводилась для 3 гидрологических постов (р. ПолOMETь – с. Яжелбицы, р. ПолOMETь – д. Ермошкино, р. ПолOMETь – с. Лычково) с использованием девяти сценариев выпадения жидких осадков за период с мая по октябрь 2020 г. (таблица 2).

Таблица 2 – Сценарии входных данных об осадках

| № сценария | Источники данных   | Временное разрешение |
|------------|--|----------------------|
| 1          | данные 2 метеорологических станций государственной сети Росгидромет (Валдай, Демянск)                        | сутки                |
| 2          | данные 5 осадкомерных пунктов Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ» (Таежный, Дворец, Яжелбицы, Ермошкино, Лычково) | сутки                |
| 3          | радиолокационные данные ДМРЛ-С «Валдай»  | сутки                |
| 4          | комбинирование радиолокационных данных ДМРЛ-С «Валдай» и всех наземных станций                               | сутки                |
| 5          | данные 1 плувиографа Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ» (Яжелбицы)   | час                  |
| 6          | радиолокационные данные ДМРЛ-С «Валдай»  | час                  |
| 7          | комбинирование радиолокационных данных ДМРЛ-С «Валдай» и данных плувиографа                                  | час                  |
| 8          | данные реанализа ERA5  | сутки                |
| 9          | данные реанализа ERA5  | час                  |

Для всех сценариев использовались параметры откалиброванной модели, таким образом, оценивалась чувствительность модели к изменению детальности данных атмосферных осадков, задаваемых в качестве входных. Для сценариев № 3, 4 для “разгона” модели использованы интерполяционные данные сценариев № 1 и 2, для сценариев № 5 – 7 — часовые суммы осадков реанализа ERA5.

Так как модель SWAT не предполагает ввода пространственно-распределенных данных об осадках, то для сценариев № 3, 4, 6, 7 водосбор был представлен в виде сетки радиолокационных измерений 2 x 2 км, где были выбраны 63 репрезентативные точки, информация об отражаемости которых, переведенная в слой осадков на основе выведенного автором  $ZR$ -отношения, в дальнейшем использовалась для моделирования. (рисунок 12).



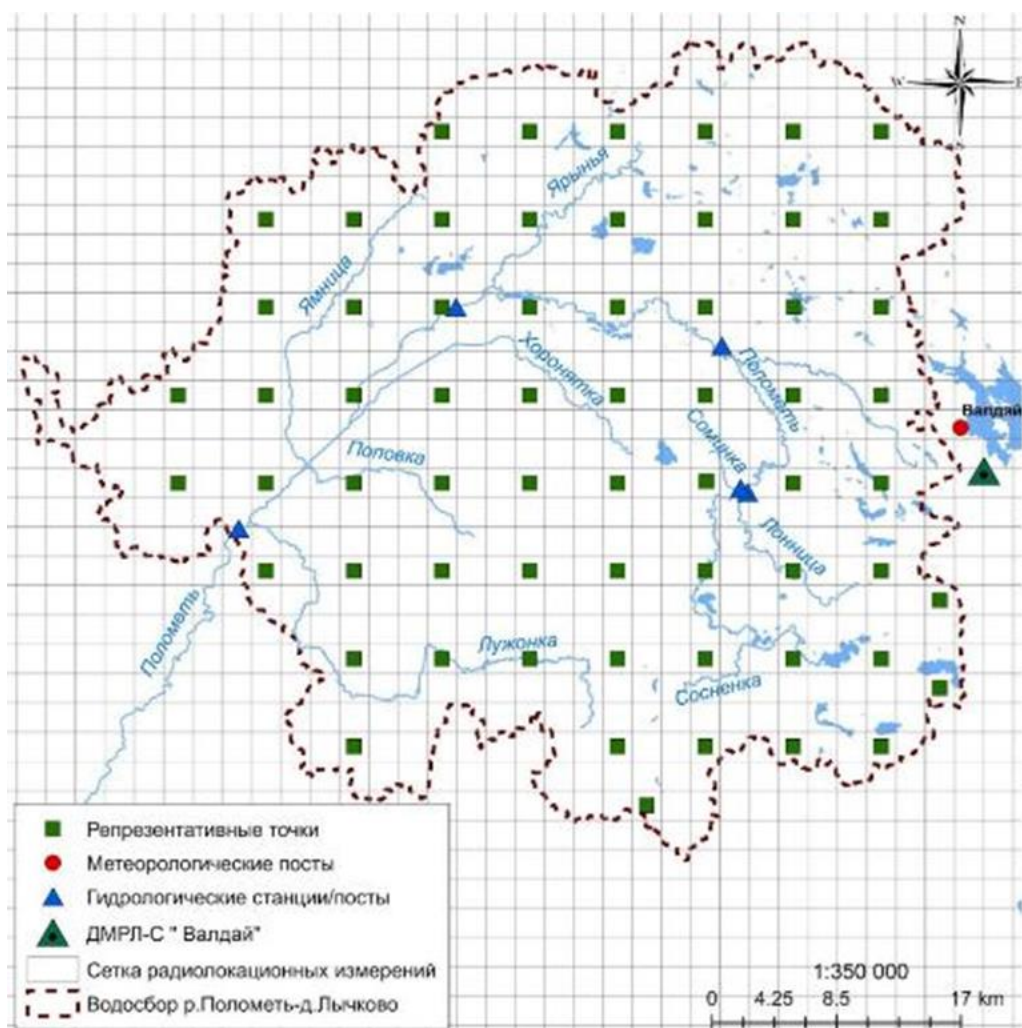


Рисунок 12 – Схема водосбора р. Полометь с сеткой радиолокационных измерений

При комбинировании радиолокационных и наземных измерений использовался метод интерполяции невязок. Для каждого срока (сутки, час) рассчитывалась разница между данными локатора и осадкомеров в местах их расположения, затем методом естественной окрестности (natural neighbor interpolation) невязка воспроизводится в виде сетки измерений локатора и вычитается из радиолокационного поля осадков.

Полученные результаты представлены в таблице 3, из которой следует, что модель чувствительна к новой информации, так как значения критериев качества моделирования отличаются в зависимости выбранных сценариев.

Таблица 3 – Значения критериев  $NSE$ ,  $KGE$  и  $\delta$  за расчетные периоды моделирования с различными типами входных данных об осадках

| Пост                     | № Сценария                  | №1    | №2          | №3           | №4          | №5          | №6           | №7    | №8    | №9    |
|--------------------------|-----------------------------|-------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------|-------|-------|
|                          | Критерий                    |       |             |              |             |             |              |       |       |       |
| р.Полометь – с.Яжелбицы  | $NSE_{\text{сезон}}$        | 0,76  | 0,47        | <b>0,84</b>  | 0,77        | 0,56        | <b>0,73</b>  | 0,49  | 0,10  | -0,05 |
|                          | $KGE_{\text{сезон}}$        | 0,57  | 0,25        | <b>0,65</b>  | 0,61        | 0,42        | <b>0,47</b>  | 0,30  | 0,03  | -0,05 |
|                          | $\delta_{\text{сезон, \%}}$ | -38,1 | -48,7       | <b>-18,2</b> | -33,6       | -43,1       | <b>-39,3</b> | -63,6 | -88,3 | -93,4 |
| р.Полометь – д.Ермошкино | $NSE_{\text{сезон}}$        | 0,82  | 0,75        | <b>0,85</b>  | <b>0,85</b> | 0,80        | <b>0,83</b>  | 0,71  | 0,34  | 0,31  |
|                          | $KGE_{\text{сезон}}$        | 0,63  | 0,50        | <b>0,75</b>  | 0,69        | 0,63        | <b>0,65</b>  | 0,43  | 0,11  | 0,10  |
|                          | $\delta_{\text{сезон, \%}}$ | -31,7 | -46,8       | <b>-20,4</b> | -23,3       | -33,7       | <b>-32,3</b> | -55,0 | -78,1 | -78,6 |
| р.Полометь – с.Лычково   | $NSE_{\text{сезон}}$        | 0,36  | 0,48        | <b>0,65</b>  | 0,50        | 0,43        | <b>0,56</b>  | 0,05  | -0,80 | -0,95 |
|                          | $KGE_{\text{сезон}}$        | 0,02  | <b>0,15</b> | 0,13         | 0,21        | <b>0,10</b> | 0,09         | -0,05 | -0,37 | -0,42 |
|                          | $\delta_{\text{сезон, \%}}$ | -48,2 | -45,0       | <b>-15,6</b> | -37,5       | -44,1       | <b>-41,1</b> | -76,0 | -103  | -109  |

Результаты расчета по данным реанализа ERA5 с суточным и часовым временным разрешением (сценарии № 8 и 9) показали неудовлетворительное качество моделирования и характеризуются худшими значениями критериев  $NSE$ ,  $KGE$  и  $\delta$  среди всех сценариев. Полученные результаты доказывают, что данные реанализа не могут быть использованы для моделирования дождевых паводков.

Низкие значения критериев качества моделирования для поста с. Лычково обусловлены недостатками в расчетах трансформации паводочной волны (распластывание паводка). Морфометрические характеристики определялись на основе цифровой модели рельефа, которая не учитывает особенности рельефа и русловой сети на участке от поста д. Ермошкино до с. Лычково, где с 1990–х годов происходит заиление и зарастание русла и поймы вследствие прекращения расчисток от наносов.

Разница между суточным моделированием и с шагом менее суток для сценариев заключается в процедуре расчета инфильтрации в модели SWAT. Так, на примере сопоставления результатов моделирования по часовым и суточным суммам осадков одного плювиографа наблюдаемый и рассчитанный гидрографы имеют некоторые различия (рисунок 13).

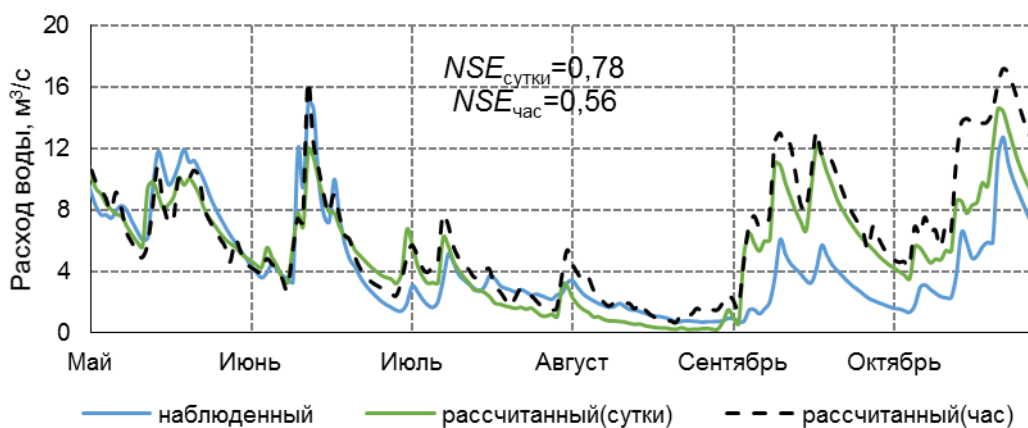


Рисунок 13 – Наблюденный и рассчитанные гидрографы стока р. Полометь – с. Яжелбицы по часовым и суточным суммам осадков за летне-осенний период 2020 г.

Процедура расчета инфильтрации выполняется в каждой гидрологической расчетной единице (HRU) с каждым временным интервалом. Вода, которая не просачивается, становится поверхностным стоком. Еще одной особенностью моделирования с шагом менее суток является то, что поверхностный сток рассчитывается на каждый интервал времени, в то время как базовый (грунтовый) сток и испарение рассчитываются в суточном масштабе и равномерно распределяются для каждого временного шага, из-за чего может происходить как недоучет, так и переоценка величин испарения и грунтового стока. Очевидно, что более широкое применение моделей с часовым разрешением по времени потребует их насыщения высокочастотными данными по испарению с водной поверхности и суши, которые в настоящее время практически полностью отсутствуют.

При сравнении результатов моделирования различных сценариев, основываясь на значениях критериев эффективности, наилучшие результаты получены с использованием радиолокационных данных метеорологического лоатора ДМРЛ-С «Валдай» (сценарий № 3, 6), особенно хорошая сходимость показана для дождевых паводков за осенние месяцы, что, вероятно, связано с типом выпадающих дождей. Так, в случае с обложными осадками, где распределение интенсивности более равномерно по времени и территории, лоатор с меньшей погрешностью воспроизводит количество выпавших осадков, а при высокой интенсивности и неоднородном распределении (ливневой тип) ошибки радиолокационной оценки атмосферных осадков выше, что в свою очередь влияет на моделирование речного стока.

Несмотря на низкие значения критериев, визуально лучшая сходимость периода с мая по август получена при использовании часовых данных пливвиографа «Яжелбицы». Рассчитанный гидрограф точно повторяет динамику изменений наблюдаемых расходов воды, их амплитуду и фазу.

При анализе результатов моделирования с использованием часовых данных, где значения критериев сходимости гидрографов по сценариям № 5, 6, 7 получились несколько ниже, чем при суточных, выявлено, что снижение качества моделирования связано в первую очередь с методом расчета инфильтрации при использовании входных данных с разной временной детализацией. Одной из причин падения качества моделирования стока по сценариям № 5 является отсутствие учета пространственной изменчивости параметров  $ZR$ -отношения при определении количества осадков радиолокационным способом.

При моделировании с использованием комбинирования радиолокационных и наземных осадков большое влияние на результаты оказывает выбор «эталонных» данных для расчета невязки, их месторасположение и количество. Так, наличие даже одного наземного пункта наблюдений совместно с радиолокационными данными не способно повысить качество моделирования.

Из результатов моделирования следует, что при моделировании дождевых паводков, вызванных обложным типом осадков, использование радиолокационных данных дает лучшую сходимость с наблюдаемыми расходами, чем при расчете с использованием наземных и комбинированных данных.

Таким образом, проведенные эксперименты однозначно свидетельствуют о том, что радиолокационная информация об осадках имеет значительный потенциал для повышения надежности воспроизведения гидрологическими моделями дождевых паводков. В этой связи целесообразным представляется как расширение сети наземных метеорологических локаторов ДМРЛ-С, так и разработка сшивок метеорологических характеристик, получаемых с локаторной сети, в целях формирования единого поля количества осадков над водосборами средних и крупных рек.

**В Заключение** представлены основные результаты диссертационного исследования:

1. Выполнен анализ и уточнены оценки трендов многолетних рядов гидрометеорологических данных для исследуемого региона. Для большинства рассматриваемых рек выявлено увеличение максимальных расходов воды дождевых паводков и повышение частоты их превышения над соответствующими максимальными расходами воды весенних половодий на малых и средних реках. Основной фактор увеличения роли дождевого стока — рост сезонной суммы осадков (общая увлажненность) на всей территории исследования совместно с увеличением интенсивности выпадения осадков на фоне снижения стока весеннего половодья;
2. Проведен сравнительный анализ данных атмосферных осадков глобального реанализа ERA5 и метеорологического локатора ДМРЛ-С «Валдай» с данными наземных наблюдений территории Валдайской возвышенности и установлено, что:

- данные реанализа не воспроизводят часовую и суточную изменчивость жидких осадков, связь прослеживается лишь при сопоставлении сезонных сумм осадков;
  - наилучшее соотношение локаторных и наземных данных об осадках может быть достигнуто для эмпирически подобранных параметров  $ZR$ -отношения;
3. На основе сравнения с независимыми данными продемонстрировано, что современные региональные и глобальные сеточные архивы осадков и речного стока (реанализы) не способны надежно воспроизводить дождевые паводки на малых водосборах;
4. Проведена адаптация модели SWAT к условиям формирования стока бассейна реки Полометь и выполнено моделирование дождевых паводков с использованием различных типов данных об атмосферных осадках. На основе сравнения результатов моделирования дождевых паводков определено, что:
- наилучшие результаты моделирования достигнуты при использовании радиолокационных данных как источника данных об осадках;
  - комбинированные данные способны повысить качество моделирования дождевого стока при условии использования нескольких наземных пунктов при калибровке локатора и расчете невязки;
  - использование ежечасных данных об осадках позволяет существенно повысить качество моделирования максимальных расходов дождевых паводков.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

В изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. **Greк, E.**; Zhuravlev, S. Simulation of Rainfall-Induced Floods in Small Catchments (the Polomet' River, North-West Russia) Using Rain Gauge and Radar Data. *Hydrology* 2020, 7, 92. <https://doi.org/10.3390/hydrology7040092>;
2. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., **Грек Е.Н.**, Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. Оценка современных изменений максимального стока рек России. - *Метеорология и гидрология*, 2019, №11, с. 46-55;
3. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., **Грек Е.Н.**, Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. Пространственно-временные изменения характеристик экстремального стока рек бассейна Волги. - *Метеорология и гидрология*, 2018, №10, с. 8-16;

**Материалы научных конференций:**

4. **Грек Е.Н.**, Журавлев С.А. Многолетние изменения характеристик дождевых паводков и осадков в российской части бассейна Балтийского моря // Статья в сборнике трудов конференции «Гидрометеорология и экология: Достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2019 года). Санкт-Петербург, 2019. С. 236-238;
5. **Грек Е.Н.**, Журавлев С.А. Многолетние изменения характеристик дождевых паводков и осадков в российской части бассейна Балтийского моря // Статья в сборник результатов международной научной конференции «Четвертые Виноградовские Чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению» (Санкт-Петербург, 23 - 31 октября 2020). Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2020. С. 595-599;
6. **Greк, E.**; Zhuravlev, S. Using the radar- and ground-based measurements for rainfall floods modeling in small catchments (the Polomet' river, Russia) // The European Geosciences Union General Assembly, 2020. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-1042>;
7. **Greк, E.**; Kurochkina, L. Recent and future trends of river runoff in the North-West Russia // The European Geosciences Union General Assembly 2022. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-601>.