

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

На правах рукописи



Грек Елена Николаевна

**Пространственно-временная изменчивость
дождевых паводков на малых и средних реках
Северо-Запада России**

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный гидрологический институт»

- Научный руководитель** – ***Журавлев Сергей Александрович**, кандидат географических наук, директор Государственного гидрологического института*
- Официальные оппоненты** – ***Кондратьев Сергей Алексеевич**, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории математических методов моделирования Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН*
- Коронкевич Николай Иванович**, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии Института географии РАН*
- Магрицкий Дмитрий Владимирович**, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры гидрологии суши Географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова*

Защита диссертации состоится «02» марта 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2(МГУ.11.02) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)9392238, факс +7(495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/520922154/>

Автореферат разослан «__» января 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В условиях современного потепления климата на территории Российской Федерации со второй половины 1970-х гг. прошлого века происходит изменение водного режима рек [Второй оценочный доклад, 2014; Фролова и др., 2020; Гельфан и др., 2021]. Для ряда регионов отмечается повышение частоты опасных гидрологических явлений [Георгиевский и др., 2019].

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, наблюдавшиеся в последние годы в различных регионах страны (Крым, 2021; Иркутская область, 2019; Новгородская область, 2019; Забайкальский край, 2018; Краснодарский край, г. Крымск, 2012; Краснодарский край, 2002), 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 их характеристик на региональном уровне.

Повышение частоты возникновения экстремальных дождевых паводков подтверждает современные представления о происходящем изменении структуры выпадения осадков [Золина, Булыгина, 2016; Шабанов, 2017] и указывает на вероятное повышение связанных с ними гидрологических рисков. 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 водохозяйственной инфраструктуры, систем водоотведения.

Диссертация посвящена оценке современных изменений максимального стока дождевых паводков и выявлению причин, их обуславливающих, для южной части Северо-Запада России. **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:

- 1) анализ современных изменений характеристик атмосферных осадков и дождевого стока исследуемой территории;
- 2) оценка параметров уравнения связи интенсивности осадков и радиолокационной отражаемости по данным наземных измерений осадков для доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С «Валдай»;
- 3) оценка влияния исходной метеорологической информации с различной детализацией на результаты моделирования стока и соответствующий анализ чувствительности модели;
- 4) апробация методов комбинирования радиолокационных и наземных данных для информационного насыщения гидрологических моделей.

Объект и предмет исследования. Объекты исследования – малые и средние реки Северо-Запада России, включая южные притоки Свири, Ладожского озера, Невы и Финского залива Балтийского моря. 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 современные 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;
- предложен и 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 р. 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 паводкоопасных регионов РФ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Большинство рек исследуемого региона характеризуются положительной тенденцией многолетних изменений максимальных расходов воды дождевых паводков (5,7% / 10 лет). 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 малых вероятностей превышения, что обусловлено одновременным уменьшением стока весенних половодий и увеличением максимальных расходов дождевых паводков;

2. Повышение стока дождевых паводков связано с увеличением интенсивности выпадения осадков (до 0,13 мм/мин / 10 лет) и ростом суммы осадков в теплый период (в среднем 10 мм / 10 лет);

3. Данные современных региональных и глобальных сеточных архивов речного стока, опирающиеся на стандартную сетевую гидрометеорологическую информацию и (или) реанализы, занижают характеристики максимального дождевого стока для малых водосборов на 30–50%;

4. Модельными экспериментами на примере р. Полометь за 2020 г. установлено, что радиолокационные и комбинированные данные об осадках обладают высоким потенциалом для повышения качества моделирования

дождевого стока. При их использовании критерий эффективности моделирования NSE повысился с 0,65 до 0,78, относительная ошибка моделирования максимального расхода воды дождевых паводков снизилась с 35% до 12%. 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 использованием большого объема гидрометеорологической информации с наблюдательной сети Росгидромета, верификацией результатов расчетов по данным многолетних наблюдений, в том числе Валдайского филиала ГГИ, а также апробацией результатов работы на международных и всероссийских научных конференциях.

Личный вклад автора. Сбор и обработка гидрологических и метеорологических данных, анализ многолетних изменений характеристик 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), Международная научная конференция «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению» (Санкт-Петербург, 2020), Генеральная ассамблея Европейского Союза наук о Земле (Вена, 2020, 2022).

Результаты диссертационного исследования нашли отражение при выполнении проекта РФФИ РФФИ-Аспиранты «Дождевые паводки Северо-Запада России: оценка изменчивости и разработка новых методов прогнозирования» (№ 19-35-90123).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 работы в научных изданиях, определенных положением о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка используемых источников и 1 приложения. Общий объем работы составляет 146 страниц, работа иллюстрирована 61 рисунком и содержит 22 таблицы. Список используемых источников содержит 202 наименования, в том числе 116 – на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Глава 1. Современные оценки и методы исследования паводочного стока

Первая глава посвящена обзору работ по анализу многолетних изменений максимального дождевого стока и атмосферных осадков. Отмечается, что тенденции изменений максимальных расходов воды в условиях современного потепления климата неоднозначны [Георгиевский и др., 2019]. В целом по стране число опасных гидрологических явлений в результате повышения уровня воды выше критических отметок в период дождевых паводков и весеннего половодья увеличивается, при этом доля быстроразвивающихся наводнений дождевого происхождения растет [Козлов и др., 2021]. Наряду с этим, в последние десятилетия в ряде регионов произошло увеличение интенсивности и повторяемости дождевых паводков. Так, на реках, где максимальные в году расходы воды формируются в период прохождения дождевых паводков (Северный Кавказ, Дальневосточное Приморье), повторяемость опасных наводнений увеличивается [Второй оценочный доклад, 2014; Георгиевский и др., 2014], а на реках, где ранее не наблюдалось значительных дождевых паводков, отмечается рост максимальных расходов воды (реки северо-восточной части бассейна р. Дон) [Научно-прикладной справочник, 2020]. Вместе с тем, во многих частях России выявлено увеличение доли и интенсивности ливневых осадков одновременно с ростом длительности влажных периодов [Zolina et al., 2013, Chernokulsky et al., 2019] и, согласно сценарным прогнозам [Катцов и др., 2022], такая тенденция сохранится и в будущем.

В главе также рассмотрены основные источники данных об атмосферных осадках, их основные преимущества и недостатки, приводится обзор работ, посвященных оценке влияния метеорологической информации и, прежде всего, радиолокационных и комбинированных данных об атмосферных осадках, на результаты гидрологического моделирования. 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.

Глава 2. Современные изменения характеристик дождевых паводков исследуемого региона

Во **второй главе** приводится физико-географическое описание района исследований, представлены результаты оценки применимости сеточных продуктов гидрометеорологических данных для расчета дождевых паводков, а также анализа многолетних изменений максимального дождевого стока и основных факторов, его определяющих.

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 по пяти водосборов в бассейне р. Полонья за период с 1980 по 2016 гг., показала, что реанализы обеспечивают удовлетворительную сходимость с наблюдаемыми данными только для водосборов с площадью более 2000 км², а наиболее точные результаты отмечаются по данным регионального реанализа.

Выявлено, что данные глобального реанализа осадков MSWEP воспроизводят более близкие значения к наблюдаемым по сравнению с данными реанализа ERA5. Для обоих сеточных наборов данных характерно занижение средних оценок максимального в году суточного слоя жидких осадков на 10–40%, также они не воспроизводят случаи аномально высоких суточных сумм осадков. Для сезонных сумм осадков (май–октябрь) наблюдаются наиболее высокие значения коэффициентов детерминации с наблюдаемыми величинами (0,61 и 0,82, по данным ERA5 и MSWEP,

соответственно), однако в 60 и 40% от общего числа метеорологических станций реанализы неверно воспроизводят величину тренда и его направление.

В результате сравнения радиолокационных и наземных данных выявлено, что большое влияние на надежность определения осадков оказывают значения параметров уравнения связи (1) интенсивности осадков и отражаемости (ZR -отношение) и расстояние от осадкомера до локатора.

$$Z = AR^b \quad (1)$$

где Z – радиолокационная отражаемость, R – интенсивность осадков, мм/час, A и b – параметры, определяемые при калибровке локатора.

Представленная зависимость была получена с помощью микрофизических исследований распределения частиц осадков по размерам Маршаллом и Пальмером [Marshall, Palmer, 1948]. Согласно Временным указаниям [Временные методические указания..., 2014], параметры $A = 200$ и $b = 1,6$. Однако они изменяются в широком диапазоне и зависят от многочисленных факторов, в первую очередь, от типа осадков и особенностей синоптических процессов в районе наблюдений.

В данном исследовании проводилось уточнение параметров ZR -отношения для тёплого периода года, включающего месяцы с мая по октябрь без разделения по типам дождей. Тёплый период был выбран для того, чтобы сфокусироваться на жидких осадках. Суммы осадков по локатору сравнивались со слоями, полученными на метеостанциях. В результате был произведен подбор коэффициентов A и b по наилучшему соответствию слоям, полученным по ДМРЛ-С и метеостанциям.

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 среднеквадратической ошибки как для суточных, так и для часовых сумм осадков. Однако, локаторные данные, осредненные за сезоны, характеризуются заниженными суммами осадков по отношению к наземным на 10–15%, а точность этих данных падает по мере удаления от локатора.

Анализ трендов срочных максимальных расходов воды дождевых паводков 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 при уровне значимости (α) 0,05. В среднем для рассматриваемой территории линейный тренд составляет 5,7% / 10 лет (рисунок 1а).

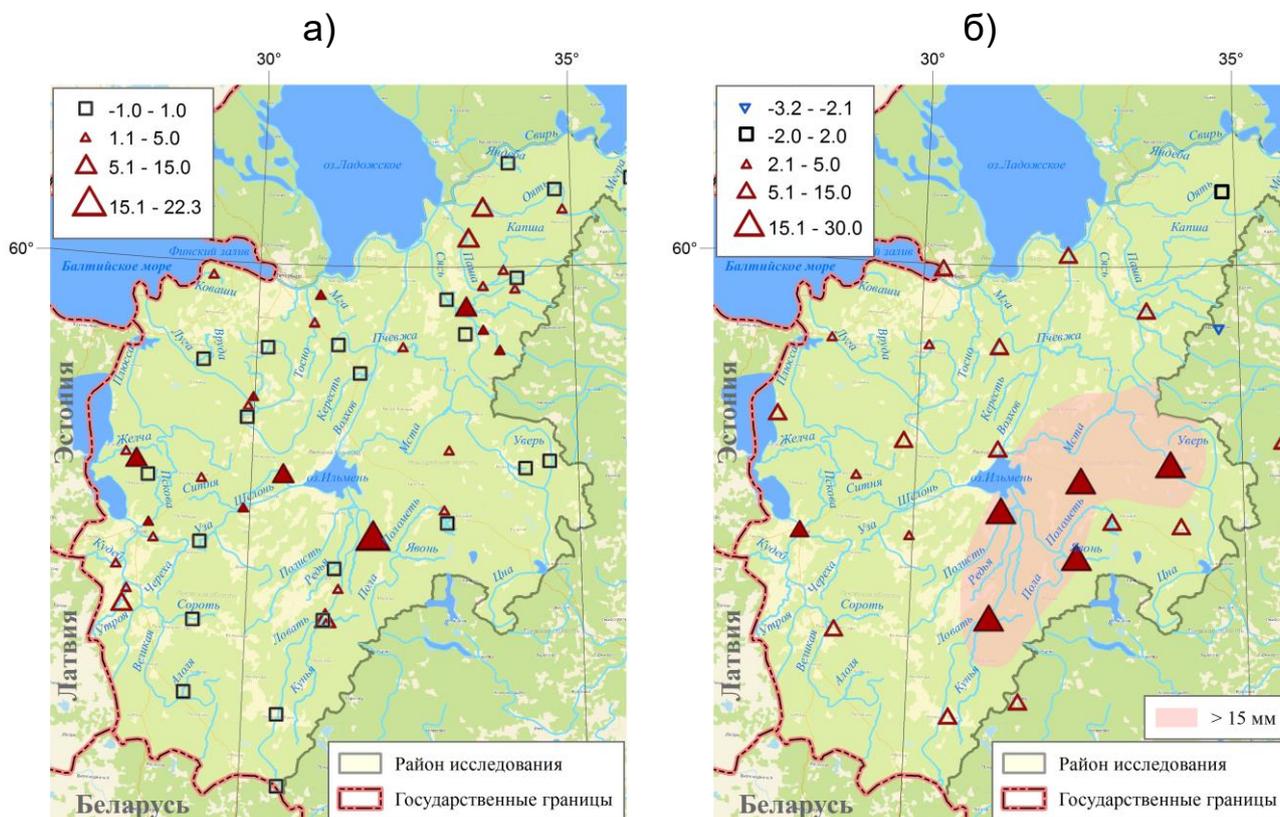


Рисунок 1 – Линейные тренды а) максимальных расходов воды дождевых паводков (% за 10 лет) и б) суммы осадков за теплый период (мм / 10 лет) за период 1966–2019 гг. Заливкой выделены станции со значимым трендом ($\alpha = 0,05$)

Анализ атмосферных осадков позволил выявить, что на территории исследования в целом наблюдается увеличение жидких атмосферных осадков. Вместе с тем, 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. 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), где выявлены положительные значимые ($\alpha = 0,05$) тренды (рисунок 2).

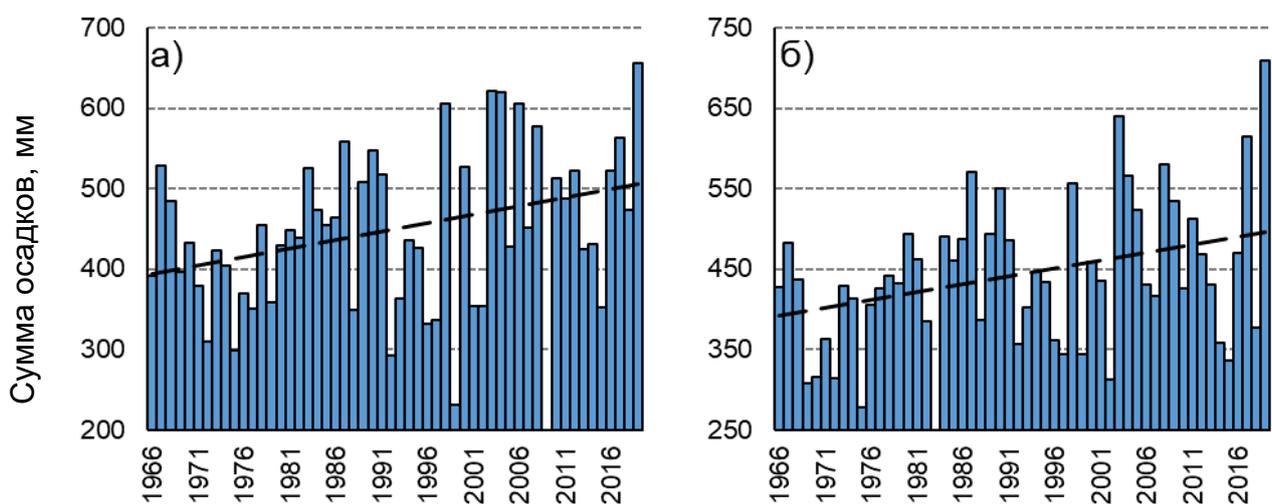


Рисунок 2 – Хронологические графики сезонных (май–октябрь) сумм осадков (мм) на метеорологических станциях а) Крестцы и б) Демянск с выявленными значимыми трендами

Границы областей изменений максимальных расходов воды и характеристик атмосферных осадков, таких как суточный максимум и суммы осадков за теплый период не совпадают. На рисунке 1а показан неоднородный характер пространственных изменений максимального дождевого стока, на котором сложно выделить единый географический район с синхронными изменениями, в то время как значимые изменения характеристик осадков имеют четкий контур (территория Валдайской возвышенности).

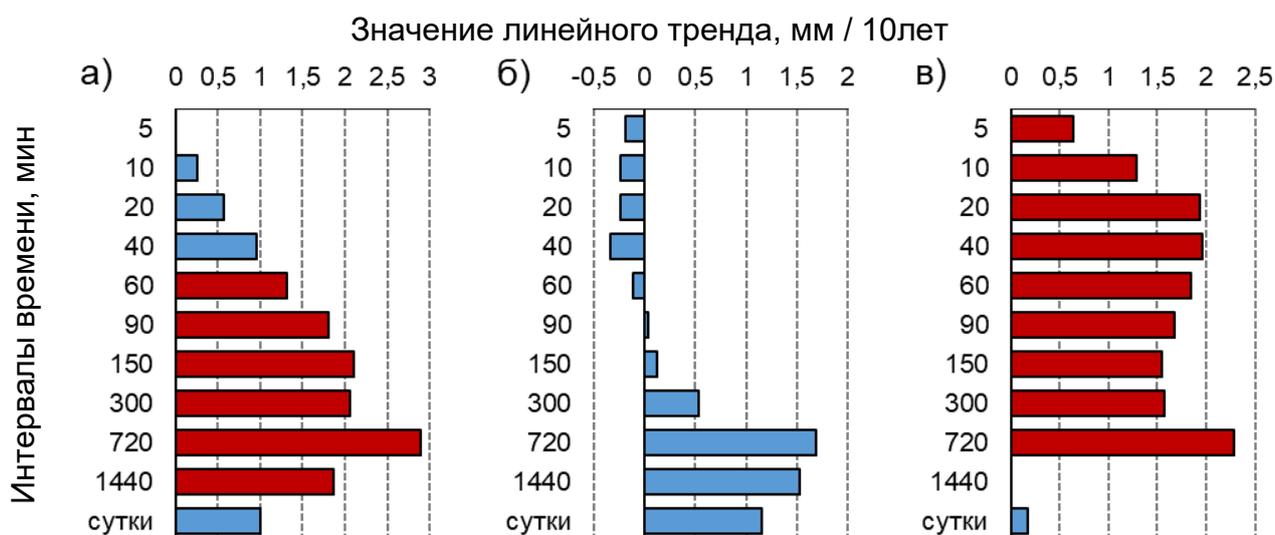


Рисунок 3 – Линейные тренды слоя осадков за короткие интервалы времени на метеорологических постах: а) Валдай, б) Санкт-Петербург и в) Новая Ладога, мм / 10 лет. Красной заливкой выделены значения со значимым трендом ($\alpha = 0,05$)

Для оценки изменений структуры выпадения дождевых осадков были проанализированы суммы осадков по данным плевниографов за короткие интервалы времени за период с 1966 по 2019 г. Полученные результаты в целом характеризуют наличие неоднородности в происходящих изменениях за рассматриваемые интервалы времени (рисунок 3).

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 минут. На двух станциях (Валдай и Новая Ладога) положительные тренды наблюдаются для всех периодов времени. Основное увеличение интенсивности выпадения осадков на интервалах от 150 до 720 минут произошло за последние 20 лет (рисунок 4).

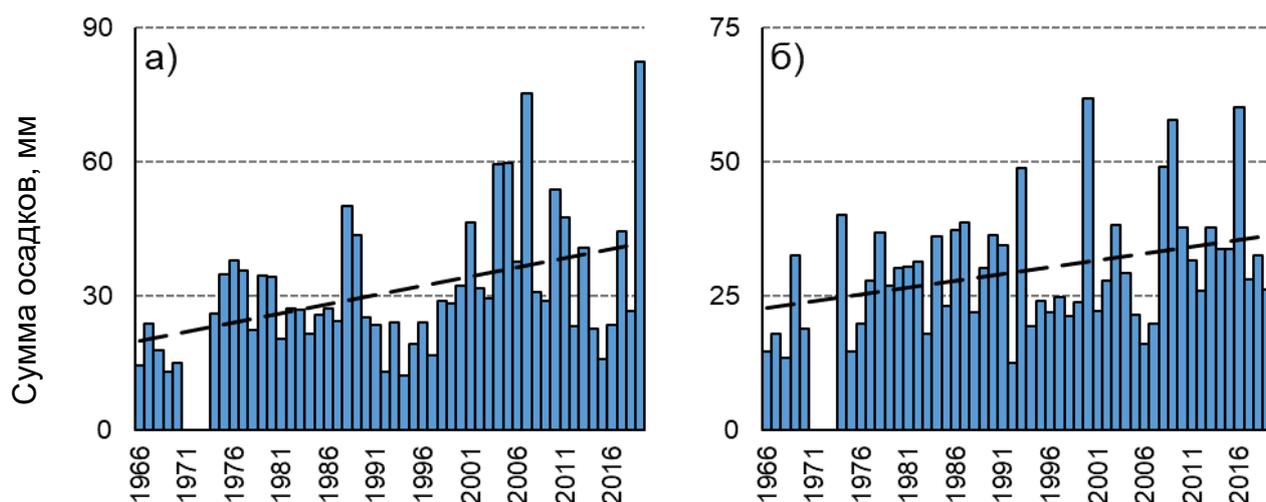


Рисунок 4 – Наибольшие слои осадков (мм) за интервал времени 720 минут на метеорологических станциях: а) Валдай, б) Новая Ладога

Кроме того, периоды до и после 2000 г. характеризуются разными статистическими параметрами (не только средним, но и дисперсией), а значения наибольших слоев осадков 1%-ной обеспеченности за короткие интервалы времени, определенные за период наблюдений с 1966 по 2000 гг., практически совпадают с приведенными в [Ресурсы поверхностных вод..., 1972], но в 1,5–2 раза меньше рассчитанных с учетом последних десятилетий (рисунок 5). Такие различия следует учитывать при выборе расчетного периода и типа кривой распределения для определения обеспеченных величин осадков.

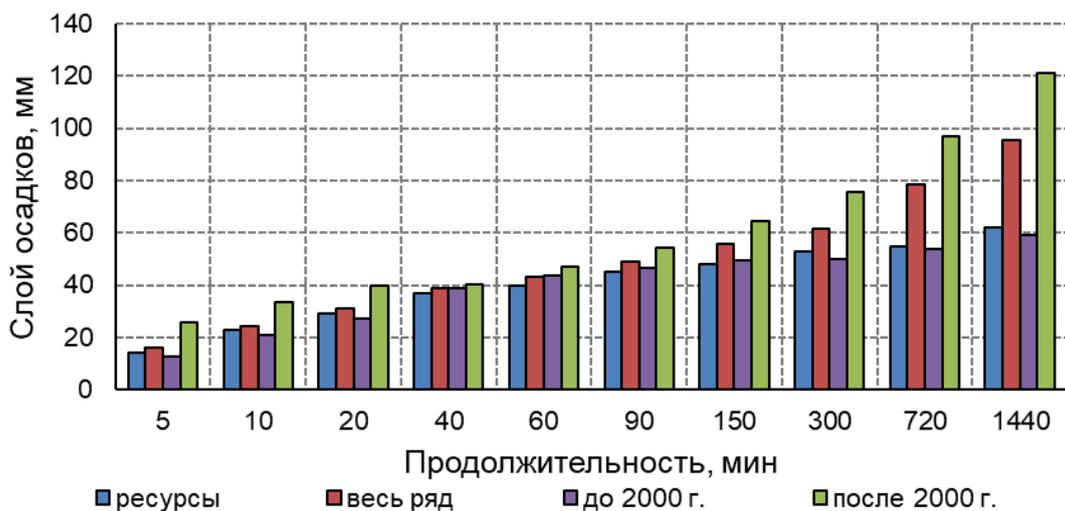


Рисунок 5 – Наибольшие слои осадков 1%-ной обеспеченности за интервалы времени на метеорологической станции Валдай

Сопоставление максимумов дождевых паводков и весенних половодий показало, что с конца 1980-х гг. отмечается резкое увеличение числа случаев превышения максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья соответствующего года (рисунки 6–7). Данная тенденция объясняется не только увеличением дождевого стока [Киреева и др., 2018], но и одновременным снижением максимального стока на большинстве рек европейской территории России (20–40%), где максимальные расходы воды формируются в период весеннего половодья [Георгиевский и др., 2019].

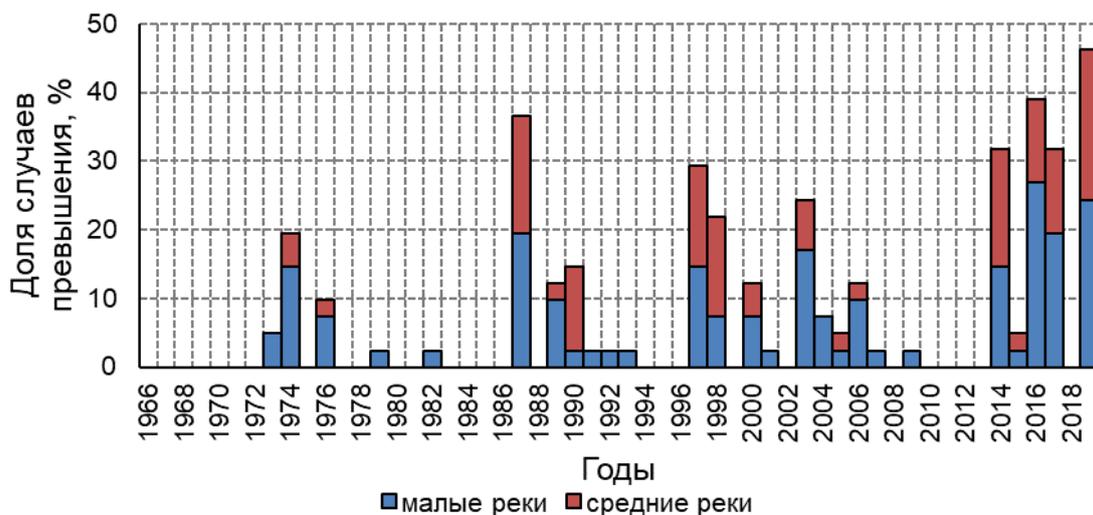


Рисунок 6 – Доля случаев (%) превышения максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья за период 1966–2019 гг.

Было выявлено, что максимальные расходы воды паводков могут превышать максимальные расходы воды половодий на всех реках района

исследования (рисунок 7). На реках в бассейне Невы такие случаи единичны, для притоков Псковско-Чудского озера – довольно часты.

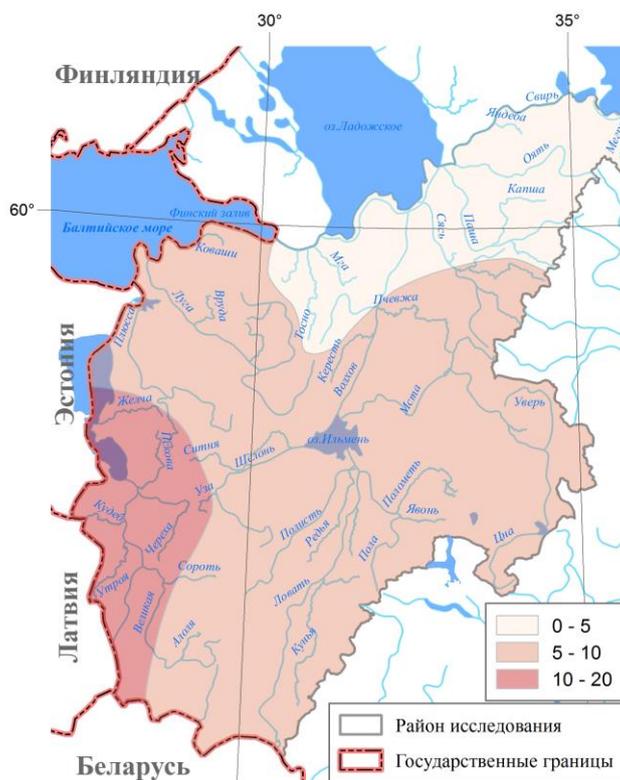


Рисунок 7 – Доля случаев (%) превышения максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья

Помимо повышения частоты превышения паводков над половодьями, произошел и существенный рост величины соотношения максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий 1%-ной обеспеченности. Выделяются бассейны рек Мсты, Пола, Полонети, где значение данного соотношения дождевых и снеговых максимумов наиболее высокое и составляет до 0,9–1,0, в некоторых случаях может достигать 1,2–1,6.

Глава 3. Моделирование дождевых паводков с использованием различных типов данных

В третьей главе рассматривается подход к моделированию водного режима с использованием различных типов данных об атмосферных осадках на примере бассейна р. Полонеть. Кратко приведено описание модели Soil and Water Assessment Tools (SWAT), объекта моделирования и исходных данных.

Выбор бассейна р. Полонеть 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. Выбор модели SWAT обусловлен возможностью использования входных данных об атмосферных осадках с шагом менее суток (до 10 минут).

Источниками информации об осадках послужили данные наблюдений осадкомеров, плевниографа, радиолокационных измерений ДМРЛ-С «Валдай» и глобальных реанализов MSWEP и ERA5.

Для моделирования был разработан ГИС-проект 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 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 км²);
- р. Полометь – д. Дворец (площадь водосбора – 432 км²);
- р. Полометь – с. Яжелбицы (площадь водосбора – 631 км²);
- р. Полометь – д. Ермошкино (площадь водосбора – 1180 км²);
- р. Полометь – с. Лычково (площадь водосбора – 2180 км²).

Моделирование выполнено на основе данных об атмосферных осадках Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ». Моделирование проводилось за период 1991–2018 гг. (28 лет). Были выделены периоды «разгона» модели 1991–1993 гг. (3 года), калибровки 1994–2006 гг. (13 лет) и верификации 2007–2018 г. (12 лет). Период «разгона» из анализа был исключен.

Так как модель SWAT содержит большое число параметров, задействованных в процессе моделирования, был проведен анализ чувствительности 28 параметров, входящих в уравнения блоков динамики поверхностных, почвенных и грунтовых вод, а также в уравнения образования и таяния снежного покрова. В результате анализа чувствительности выделены параметры, оказывающие наибольшее влияние на результаты моделирования 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 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*), затем параметры, относящиеся к гидрологическим расчетным единицам (HRU): начальные значения параметра водоотдачи в условиях нормального увлажнения (*CN2*), параметр компенсации испарения из почвы, позволяющий извлекать воду из почвенного профиля (*Esco*).

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

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	<i>NSE</i>			<i>KGE</i>			δ , %		
	1994–2006	2007–2018	1994–2018	1994–2006	2007–2018	1994–2018	1994–2006	2007–2018	1994–2018
д. Мосолино	0,60	0,55	0,58	0,64	0,51	0,57	1,2	–31,8	–14,5
д. Дворец	0,65	0,67	0,66	0,74	0,46	0,63	–2,8	–35,7	–17,4
с. Яжелбицы	0,70	0,72	0,71	0,75	0,76	0,76	2,0	–9,8	–4,1
д. Ермошкино	0,67	0,71	0,69	0,73	0,62	0,68	1,7	–5,0	–1,3
с. Лычково	0,66	0,61	0,63	0,65	0,62	0,64	3,7	–12,5	–4,1

Оценка применимости данных локатора и оценка влияния пространственной и временной детальности данных атмосферных осадков на результаты моделирования дождевых паводков проводилась для трех гидрологических постов (р. Полометь – с. Яжелбицы, р. Полометь – д. Ермошкино, р. Полометь – с. Лычково) с использованием различных вариантов исходных данных атмосферных осадков за период с мая по октябрь 2020 г. (таблица 2, рисунок 8).

Таблица 2 – Варианты входных данных об осадках

№ варианта	Источники данных	Временное разрешение
1	2 метеорологические станции государственной сети Росгидромет (Валдай, Демянск)	сутки
2	5 осадкомерных пунктов Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ» (Тажный, Дворец, Яжелбицы, Ермошкино, Лычково)	сутки
3	ДМРЛ-С «Валдай»	сутки
4	комбинирование радиолокационных данных ДМРЛ-С «Валдай» и всех наземных станций	сутки
5	1 плевниограф Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ» (Яжелбицы)	час
6	ДМРЛ-С «Валдай»	час
7	комбинирование радиолокационных данных ДМРЛ-С «Валдай» и данных плевниографа	час
8	реанализ MSWEP	сутки
9	реанализ ERA5	сутки
10	реанализ ERA5	час

Модельные расчеты были выполнены для 2020 г., который освящен всеми видами наблюдений за атмосферными осадками без пропусков в данных.

Для каждого варианта расчет проводился одним прогоном для всего периода моделирования с 1991 по 2020 г., и использовались параметры откалиброванной модели, таким образом оценивалась чувствительность модели к изменению детальности данных атмосферных осадков, задаваемых в качестве входных. Для “разгона” модели (1991–2019 гг.) в качестве входных применялись данные каждого варианта. Для вариантов № 3, 4 использовались интерполяционные данные вариантов № 1 и 2, для вариантов № 5–7 – часовые суммы осадков реанализа ERA5.

Так как модель SWAT не предполагает ввода пространственно-распределенных данных об осадках, то для вариантов № 3, 4, 6, 7 водосбор был представлен в виде сетки радиолокационных измерений 2 x 2 км, где были выбраны 63 расчетные точки (узлы), информация об отражаемости которых, переведенная в слой осадков на основе эмпирически подобранных параметров уравнения, в дальнейшем использовалась для моделирования (рисунок 8б).

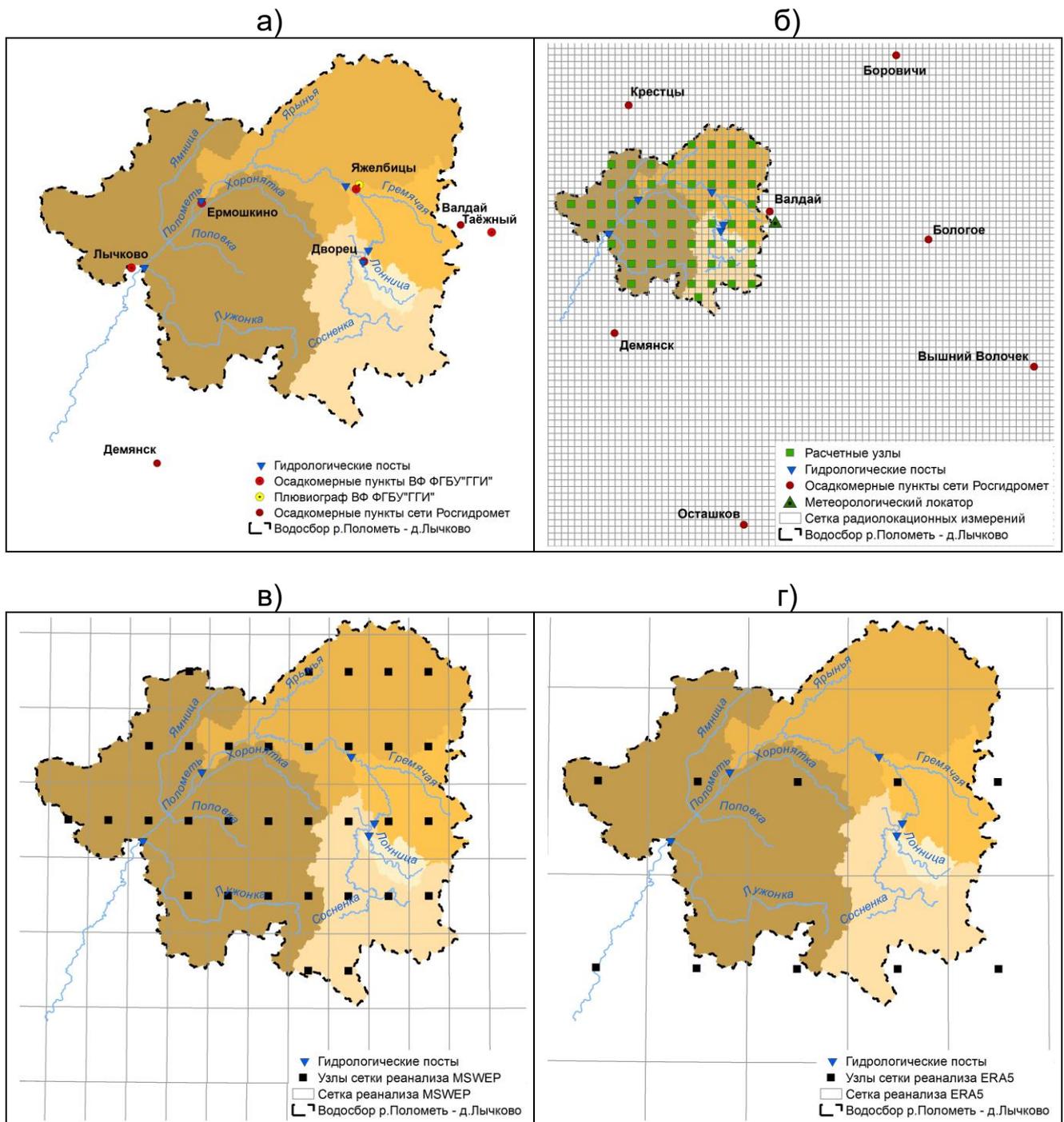


Рисунок 8 – Схема расположения пунктов наблюдений за атмосферными осадками для вариантов №: а) 1, 2, 5; б) 3, 4, 6, 7 и в) 8; г) 9, 10

При комбинировании радиолокационных и наземных измерений (вариант № 4) 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 воспроизводилась в виде сетки измерений локатора и вычиталась из радиолокационного поля осадков. Расчет значений невязки для

вариантов № 4, 7 производился на основе данных тех постов, которые участвовали в калибровке метеорологического локатора.

Для вариантов № 8 (рисунок 8в), 9 и 10 (рисунок 8г) использовались данные, полученные в узлах сетки реанализа, находящиеся в пределах и у границ водосбора.

Для оценки качества моделирования критерии эффективности *NSE* и *KGE* рассчитывались в пределах теплого времени года с мая по октябрь по среднесуточным расходам воды, когда данные об атмосферных осадках вводились в модель, δ_{\max} (%) определялась для максимальных расходов воды дождевых паводков.

Полученные результаты показали, что модель чувствительна к дополнительной информации, так как значения критериев качества моделирования отличаются в зависимости от выбранных вариантов (таблица 3, рисунок 9).

Таблица 3 – Значения критериев *NSE*, *KGE* и δ_{\max} за расчетный период моделирования с различными типами входных данных об осадках (май–октябрь 2020 г.)

Пост	р. Полометь – с. Яжелбицы			р. Полометь – д. Ермошкино			р. Полометь – с. Лычково		
	<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	δ_{\max} , %	<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	δ_{\max} , %	<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	δ_{\max} , %
1	0,76	0,57	–35,4	0,82	0,63	–17,9	0,36	0,02	–53,7
2	0,47	0,25	–47,5	0,75	0,50	–17,7	0,48	0,15	–40,2
3	0,84	0,65	–5,0	0,85	0,75	–6,2	0,65	0,13	–26,9
4	0,77	0,61	–31,9	0,85	0,69	–10,4	0,50	0,21	–24,2
5	0,56	0,42	–53,0	0,80	0,63	4,4	0,43	0,10	–20,0
6	0,73	0,47	–23,0	0,83	0,65	–1,9	0,56	0,09	–37,2
7	0,49	0,30	–47,6	0,71	0,43	–24,3	0,05	–0,05	–23,3
8	0,74	0,63	–2,3	0,78	0,61	10,0	0,16	0,02	–28,6
9	0,10	0,03	–50,4	0,34	0,11	–21,2	–0,80	–0,37	–34,1
10	–0,05	–0,05	–55,9	0,31	0,10	–20,3	–0,95	–0,42	–36,6

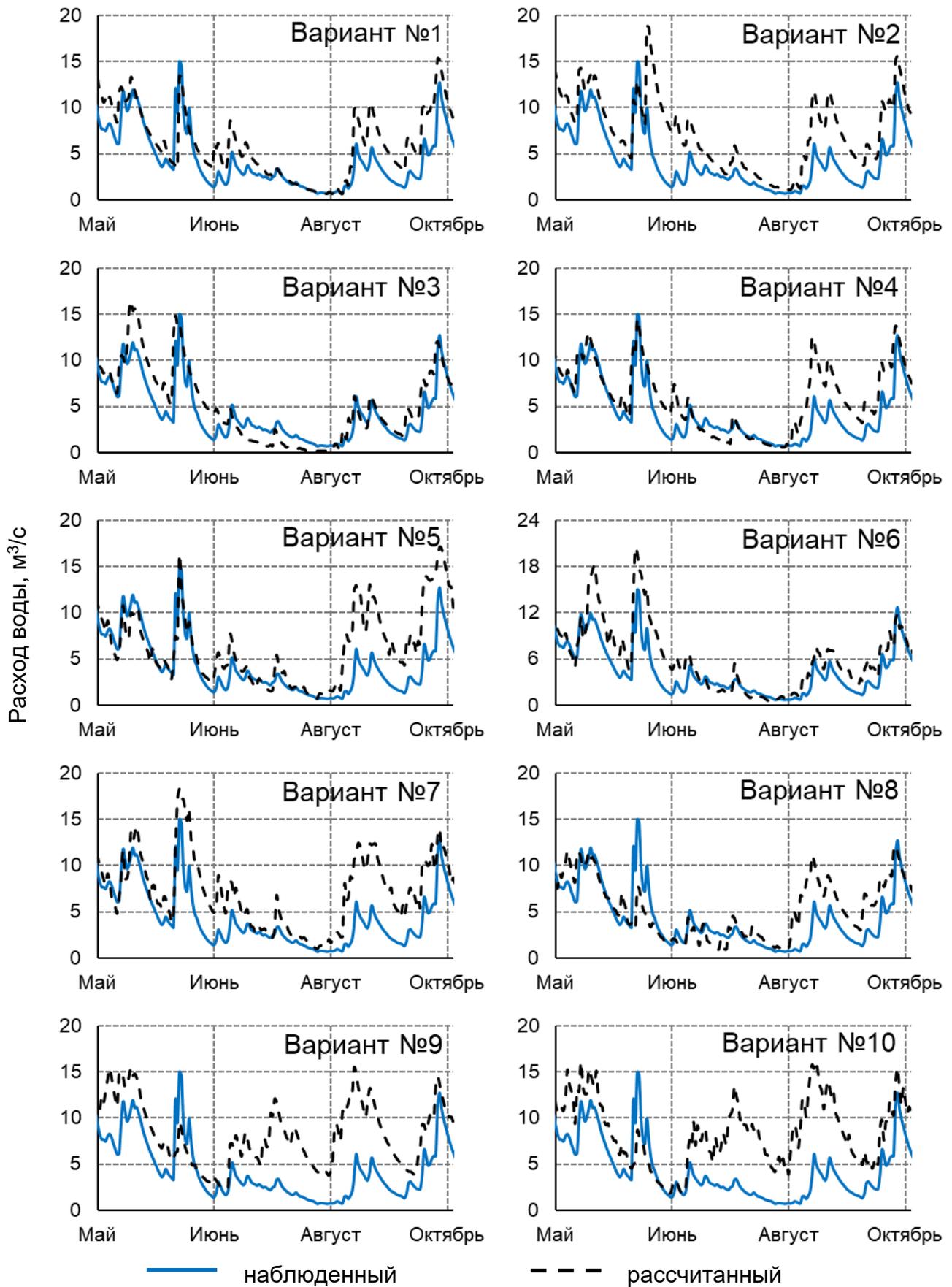


Рисунок 9 – Наблюденный и рассчитанные гидрографы стока р. Полометь – с. Яжелбицы по данным различных вариантов

Результаты расчета по варианту № 8 (реанализ MSWEP), согласно полученным значениям критериев качества, могут быть признаны удовлетворительными, однако, они характеризуются значительными расхождениями в максимальных расходах воды летне-осенних паводков. Расчеты по данным реанализа ERA5 с суточным и часовым временным разрешением (варианты № 9 и 10) показали неудовлетворительное качество моделирования и характеризуются худшими значениями критериев NSE , KGE и δ среди всех вариантов. Полученные результаты доказывают, что данные этого 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 гг. прошлого века происходит заиление русла вследствие прекращения его расчисток, а также зарастание поймы.

Разница между суточным моделированием и с шагом менее суток объясняется особенностями процедуры 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 10).

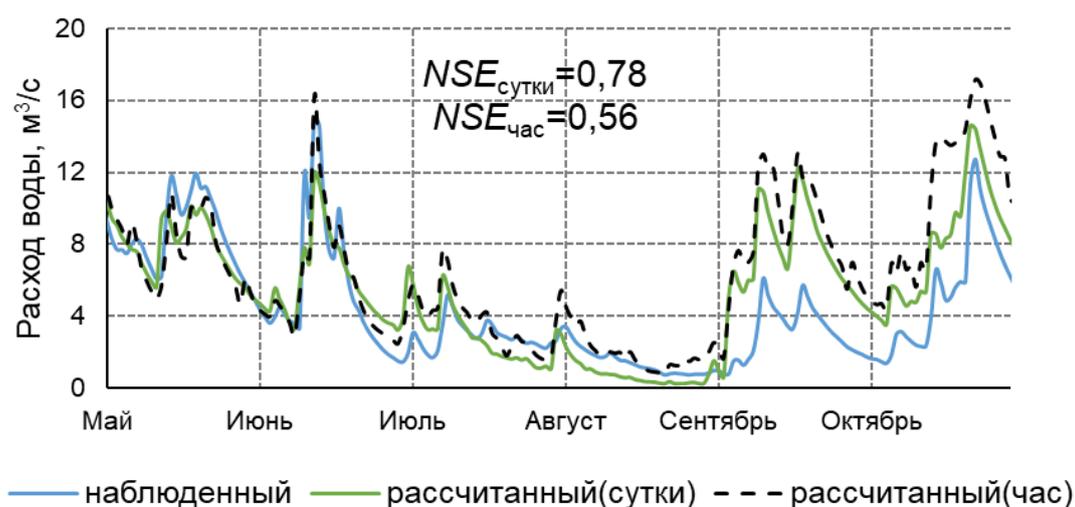


Рисунок 10 – Наблюденный и рассчитанные гидрографы стока р. Полометь – с. Яжелбицы по часовым и суточным суммам осадков за летне-осенний период 2020 г.

При моделировании с шагом менее суток сначала рассчитывается инфильтрация атмосферных осадков. Вода, которая не просачивается, становится поверхностным стоком. Испарение и базовый (грунтовый) сток оцениваются на суточном интервале и равномерно распределяются для каждого временного шага, из-за чего происходит 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 вариантов, основываясь на значениях критериев эффективности, лучшие результаты получены с использованием радиолокационных данных метеорологического лоатора ДМРЛ-С «Валдай» (варианты № 3, 6). Поскольку модель SWAT соотносит пункты наблюдений за осадками к центру каждого суббассейна по принципу «ближайшего соседа», данные лоатора наиболее близко описывают пространственную изменчивость атмосферных осадков внутри бассейна, а расположение осадкомерных пунктов вблизи гидрологических постов (осадкомерные пункты ВФ ГГИ) или за пределами водосбора (осадкомерные пункты государственной наблюдательной сети Росгидромета) приводит к снижению эффективности моделирования. Высокая сходимость выявлена 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 пьювиографа «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 вариантам № 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 снижения качества моделирования стока по вариантам № 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 одного наземного пункта наблюдений совместно с радиолокационными данными недостаточно для повышения качества моделирования.

Из результатов моделирования следует, что при моделировании дождевых паводков, вызванных обложным типом осадков, использование радиолокационных данных приводит к лучшей сходимости, чем при расчете с использованием наземных и комбинированных данных.

Таким образом, проведенные эксперименты однозначно свидетельствуют о том, что радиолокационная информация об осадках имеет высокий потенциал для повышения надежности воспроизведения гидрологическими моделями дождевых паводков. В этой связи целесообразным представляется как расширение сети наземных метеорологических локаторов ДМРЛ-С, так и интеграции информации, получаемой с локаторной сети, в целях формирования единого поля количества осадков над водосборами средних и крупных рек. Модельные расчеты с использованием радиолокационной информации в настоящей работе были выполнены за 2020 г. Для полноценного внедрения радиолокационной информации в практику гидрологического моделирования требуются многолетние непрерывные данные, которые в настоящее время отсутствуют вследствие новизны ДМРЛ-С.

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 территории исследования выявлено увеличение максимальных расходов воды дождевых паводков и повышение частоты их превышения над соответствующими максимальными расходами воды весенних половодий на малых и средних реках. Средняя величина соотношения их

расчетных величин 1%-ной вероятности превышения изменилась с 0,5 до 0,7, а в некоторых случаях достигает 1,6. Наибольшее увеличение максимальных расходов воды дождевых паводков наблюдается в бассейнах рек Мга и Воложба (18 и 17%, соответственно, за 10 лет). Превышение половодий дождевыми паводками происходит чаще всего на притоках Псковско-Чудского озера (в среднем в 15% случаев). Основной фактор увеличения дождевого стока – рост сезонной суммы осадков, приводящий к повышению общей увлажненности и снижению начальных потерь стока паводков на всей территории исследования совместно с повышением интенсивности выпадения осадков. Наиболее значительные изменения жидких осадков отмечены в районе Валдайской возвышенности (более 15 мм / 10 лет для сумм осадков за теплый период), там выявлены положительные значимые тренды для всех характеристик атмосферных осадков. По данным трёх плювиографов наблюдается увеличение интенсивности выпадения жидких осадков на временном интервале от 150 до 720 минут.

2. На основе сравнения с независимыми данными продемонстрировано, что современные региональные и глобальные сеточные архивы осадков и речного стока (реанализы) имеют различный потенциал для воспроизведения дождевых паводков на малых и средних водосборах:

- данные реанализов стока R5 и GloFAS–ERA5 занижают характеристики максимального дождевого стока для малых водосборов исследуемой территории на 30–50%;
- для водосборов площадью более 2000 км² отклонения составляют, соответственно, 3% (R5) и 20% (GloFAS–ERA5).

3. По результатам сравнительного анализа данных атмосферных осадков глобальных реанализов ERA5 и MSWEP и метеорологического локатора ДМРЛ-С «Валдай» с данными наземных наблюдений на территории Валдайской возвышенности установлено, что:

- данные реанализов неудовлетворительно воспроизводят суточную изменчивость жидких осадков, а именно занижают средние оценки максимального в году суточного слоя жидких осадков на 10–40% и не воспроизводят случаи аномально высоких суточных сумм осадков;
- связь прослеживается при сопоставлении сезонных сумм осадков, но в половине случаев реанализы неверно воспроизводят величину тренда и его направление;

- наилучшее соотношение локаторных и наземных данных об осадках для отдельных лет может быть достигнуто для эмпирически подобранных параметров ZR -отношения;

4. Предложен подход по использованию радиолокационных и комбинированных данных об атмосферных осадках для моделирования дождевых паводков. На основе модельных экспериментов с 10 вариантами входных данных определено:

- наилучшее качество моделирования отмечено для варианта № 3, в котором были использованы радиолокационные данные с суточным разрешением.

- наихудшие результаты получены при использовании данных реанализа ERA5 (варианты № 9 и 10);

- комбинирование данных способно повысить качество моделирования дождевого стока при условии использования нескольких наземных пунктов при калибровке локатора и расчете невязки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п. 2.3
Положения о присуждении ученых степеней в Московском
государственном университете имени М.В. Ломоносова:**

1. 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 (Scopus, IF (CiteScore) = 1.4).

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 (Scopus, IF (CiteScore) = 1.4).

3. **Грек Е.**, Zhuravlev S. Simulation of rainfall-induced floods in small catchments (the Polomet' River, North-West Russia) using rain gauge and radar data // Hydrology. 2020. Vol. 7. № 4. P. 92 (Scopus, IF (CiteScore) = 3.6).

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях и сборниках конференций:

4. Грек Е.Н., Журавлев С.А. Многолетние изменения характеристик дождевых паводков и осадков в российской части бассейна Балтийского моря // Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». Санкт-Петербург: Химиздат, 2019. С. 236–238 (IF = 0).

5. Грек Е.Н., Журавлев С.А. Многолетние изменения характеристик дождевых паводков и осадков в российской части бассейна Балтийского моря // Сборник результатов Международной научной конференции «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению». Санкт-Петербург: Изд-во ВВМ, 2020. С. 595–599 (IF = 0).

6. Grek 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. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-1042 (IF = 0).

7. Grek E., Kurochkina L. Recent and future trends of river runoff in the North-West Russia // The European Geosciences Union General Assembly, 2022. DOI: 10.5194/egusphere-egu22-601 (IF = 0).