

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»

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
географических наук

Научный руководитель:
Кандидат географических наук
Журавлев Сергей Александрович

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Исследования и современные оценки характеристик дождевых паводков.....	8
1.1 Современные оценки изменения максимального стока дождевых паводков	8
1.2 Существующие методы моделирования дождевых паводков	13
1.3 Использование радиолокационных данных для моделирования дождевых паводков	16
1.3.1 Комбинирование наземных и радиолокационных данных	19
1.4 Исследования дождевых паводков на Валдае	21
1.4.1 Опыт применения радиолокационных данных для речных водосборов	23
1.5 Глобальные реанализы как источники гидрометеорологических данных	24
Глава 2 Современные изменения характеристик дождевых паводков исследуемого региона	26
2.1 Физико–географическая, климатическая и гидрологическая характеристика, изученность района исследования.....	26
2.1.1 Климат	26
2.1.2 Рельеф.....	30
2.1.3 Почвы	31
2.1.4 Растительность	32
2.1.5 Геология	33
2.1.6 Гидрография	34
2.1.8 Гидрологический режим.....	35
2.1.9 Гидрологическая изученность территории исследования	36
2.2 Атмосферные осадки	37
2.2.1 Оценка точности данных реанализа.....	38
2.2.2 Оценка точности данных метеорологического локатора.....	44
2.2.3 Современные изменения	49
2.3 Дождевой сток	53
2.3.1 Оценка точности данных реанализов стока.....	53

2.3.2 Современные изменения	57
Глава 3 Моделирование дождевых паводков с использованием различных типов данных.....	65
3.1 Описание модели SWAT	65
3.2 Объект моделирования	67
3.2.1 Краткая климатическая характеристика района исследования	71
3.2.2 Особенности формирования дождевых паводков бассейна р.Полометь.....	73
3.3 Исходные данные	78
3.4 Калибровка и верификация модели SWAT	81
3.5 Влияние входных данных на результаты моделирования	88
3.5.1 Сценарии входных данных об осадках	88
3.5.2 Результаты моделирования	91
Заключение	105
Список использованной литературы.....	106

Введение

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 и результаты, 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 состояния 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.

Глава 1 Исследования и современные оценки характеристик дождевых паводков

1.1 Современные оценки изменения максимального стока дождевых паводков

Исследованию вопроса оценки изменений максимального стока дождевых паводков и обуславливающих их атмосферных осадков в период современного изменения климата посвящено множество публикаций, охватывающих как крупные территории, так и отдельные, в том числе, малые, речные бассейны.

Согласно исследованиям, проведенным в Государственном гидрологическом институте (ГГИ), 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 ($P < 10 \%$) [Георгиевский и др., 2019]. Похожие результаты представлены в работе, проведенной для территории всей Европы, где отмечено, что на крупномасштабном уровне нет четких признаков существенных изменений или значительных трендов в максимальном дождевом стоке, однако, указано на рост как частоты, так и интенсивности экстремальных осадков [Madsen et al., 2014]. Большое количество исследований посвящено изменениям в структуре выпадающих атмосферных осадков, выполненным как на региональном уровне обобщения, так и для всей территории России [Золина, Булыгина, 2016; Шабанов, 2017; Бардин, Платова, 2013]. В целом, в работах 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 [Дмитриева, Бучик, 2016; Киреева, Фролова, 2013; Коронкевич и др., 2018; Лавров, Калюжный, 2016; Kireeva et al., 2019]. Так для южной части Русской равнины было показано уменьшение стока половодья Волги и Дона [Коронкевич и др., 2018]. При этом в большей степени авторы связывают это с проведенным гидротехническим регулированием стока. Исследования, проведенные коллективом авторов ГГИ показали, что в бассейне Волги отмечаются разнонаправленные тренды (на 70 % рек наблюдается снижение, на 30 % – увеличение) в изменении стока половодья [Лавров, Калюжный, 2016]. В частности, авторы отмечают значительную роль увеличения потерь талого стока в изменениях максимальных расходов (Q_{max}) рек, особенно для центральной, западной и южной частях Европейской

территории России. Исследования, посвященные изучению динамики изменения максимального стока рек бассейна Дона показали, что за последние десятилетия произошло значительное (в некоторых случаях до 40 – 60 %) уменьшение максимального стока рек [Киреева, Фролова, 2013]. Подобные исследования, проведенные для бассейна Верхнего Дона свидетельствуют о снижении максимумов стока половодий на 38 – 45 % в период с 2001 по 2014 годы [Дмитриева, Бучик, 2016]. О снижении Q_{max} рек бассейнов Дона, Днепра и Нижней Волги свидетельствуют и исследования Георгиевского с соавторами, которые выявили уменьшение максимального стока с 1979 года по настоящее время на 40 – 60 % [Георгиевский и др., 2019]. В то же время для некоторых рек, преимущественно берущих свое начало на Урале, характерно увеличение максимального стока половодий на вышеупомянутом временном промежутке.

Особенно выделяются работы, посвященные комплексному обобщению изменений максимального стока на реках Европейской территории России [Гельфан и др., 2021; Фролова и др., 2020]. Для бассейна крупнейших рек этого региона – Дона, Волги и Оки -выявлено существенное снижение слоя стока за весенний период (до 25 – 50 %) и годового стока в целом. С конца 1970-х годов наблюдается снижение Q_{max} в среднем на 46 % (в бассейне р. Дон) и 37 % (в бассейне р. Ока). Вместе с этим авторы отмечают заметное увеличение разброса дат прохождения Q_{max} на реках Европейской части России [Фролова и др., 2020]. Однако совершенно другая картина наблюдается в северной части Европейской территории России, где на протяжении последних десятилетий на средних и крупных реках тенденций снижения максимумов весеннего половодья не обнаружено [Гельфан и др., 2021; Фролова и др. 2020]. По данным авторов, для рек Русского Севера (р. Северная Двина, р. Печора, р. Мезень) значения Q_{max} также не изменились за последние десятилетия. В то же время, для некоторых рек бассейна средней Волги – Костромы, Унжи, Ветлуги – наблюдается увеличение Q_{max} .

В целом, результаты исследований указывают на существенное снижение (20 – 40 %) максимального стока для большинства рек европейской территории России, где Q_{max} формируются в период весеннего половодья [Журавлев и др., 2017]. 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].

Обобщенные оценки изменения максимального стока рек для Восточной Европы, объединяющие большую часть Европейской территории России, частично территорию Украины, Белоруссии и Польши, выявили снижение максимумов половодья и существенное смещение дат их прохождения [Bloschl et al., 2019].

Следует отметить, что результаты исследований режима выпадения атмосферных осадков указывают не только на увеличение количества осадков, но и на изменение характера их выпадения (повышение интенсивности осадков), что ставит под вопрос целесообразность применения существующих методик расчета гидрологических характеристик дождевого стока, разработанных для условий стационарности климата в прошлом и будущем [Водные ресурсы России..., 2008]. Параметры кривых редукции осадков, лежащие в основе расчета Q_{max} дождевых паводков для малых неизученных рек, были рассчитаны еще в середине XX века, не актуализировались и зачастую используются по настоящее время без уточнения. Погрешности таких расчетов достигают 50 – 150 % [Виноградов и др., 2012], а без учета современного изменения климата результаты могут и вовсе не отражать реальную картину диапазонов распределения величин Q_{max} дождевых паводков. Работы по уточнению расчетных параметров в основном проводятся на основе данных с небольшого числа метеостанций, где сохранились плувиографические наблюдения, но и они подтверждают различия с ранее рассчитанными параметрами [Епончинцева, Клименко, 2015]. Таким образом, актуальной остается задача учета изменения структуры осадков и повышения надежности определения величин осадков малой обеспеченности.

За последние годы на некоторых реках Северо-Западного региона были зарегистрированы максимальные за весь период наблюдений максимальные расходы воды, сформированные в период прохождения дождевых паводков (р. Воложба, июль 2017 г., р. Утроя и р. Великая, август 2017 г., р. Сестра, октябрь 2018 г., р. Полометь, сентябрь 2019 г., р. Тихвинка, ноябрь 2019 г., р. Явонь, ноябрь 2021 г.), сопровождавшихся экономическим ущербом. Принято считать, что на равнинных территориях европейской части России сток дождевых паводков может превышать по высоте и объему весеннее половодье только на малых реках [Виноградов, 2010; Пособие по определению..., 1984]. Данные примеры показывают, что случаи превышения максимума дождевого паводка над максимумом половодья возможны не только на малых, но и на средних реках, что раньше являлось нехарактерным для данного региона.

Оценки возможных изменений стока рек

Оценке возможных изменений годового стока рек России в XXI веке было посвящено немало работ, основанных на применении различных климатических моделей и сценариев. В них рассматривались различные проекции изменений режима рек в зависимости от тех или иных сценариев климатических изменений [Георгиевский, Шалыгин, 2012; Георгиевский и др. 2014; Георгиевский, Голованов, 2019; Кислов и др., 2011; Хон, Мохов, 2012; Shkolnik et al., 2018].

Опыт применения ансамбля девяти глобальных моделей климата CMIP3 для незарегулированных рек бассейна Волги (при сценарии SRES-A1B оценивались аномалии норм

стока за период 2011 – 2040 годы и за 1946 – 1999 годы) выявил высокую неопределенность в оценках возможных будущих изменений годового стока рек [Георгиевский, Шалыгин, 2012]. Работа ГГИ [Георгиевский и др., 2014] подтверждает выводы о незначительных положительных аномалиях норм годового стока река при умеренных сценариях антропогенных изменений климата для большей части России, содержащиеся во Втором оценочном докладе Росгидромета. В еще одном исследовании выполнен прогноз вероятных изменений годового стока для 34 крупных рек Российской Федерации по сценариям RCP4.5, RCP8.5 [Георгиевский, Голованов, 2019]. Авторы предположили, что для большей части изученных рек возможны положительные аномалии годового стока, отрицательные аномалии были отмечены для бассейна р. Дон, Терек, Кубань. При этом для большинства рек межмодельный разброс превышал средние аномалии по ансамблю.

При том же сценарии эмиссии парниковых газов SRES-A1B по расчетным данным модели GCMs-CMIP3 оценивались изменения годового стока для пяти крупных рек России (Волги, Енисея, Оби, Лены и Амура) [Хон, Мохов, 2012]. Осредненные по ансамблю моделей изменения годового стока Волги были оценены как статистически незначимые, в то время как для Оби, Енисея и Лены был отмечен рост среднегодового расхода на 15, 20 и 25 %. Сравнению возможных изменений годового стока на территории Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири в середине XXI века (2046 – 2065 годы) и годового стока за период 1961 – 1990 гг. на основе одиннадцати глобальных моделей климата GCMs-CMIP при сценарии SRES-A2 посвящена работа Кислова А.В. с соавторами [Кислов и др., 2011]. Аномалии годового стока рек как в центральной и восточной частях Восточно-Европейской равнины, так и на реках Западной Сибири оценены авторами как незначимые. В то же время для южной части Восточно-Европейской равнины аномалии годового стока рек могут достигать 40 – 60 %.

Исследование возможных изменений максимального стока рек России в XXI веке было выполнено коллективом авторов ГГО и ГГИ [Shkolnik et al., 2018]. В сочетании с региональной климатической моделью, разработанной в ГГО, использовалась упрощенная глобальная гидродинамическая модель CaMa-Flood. Авторами ожидается значимое увеличение максимального стока половодья, особенно в замыкающих створах крупнейших рек Западной Сибири. Возможные аномалии Q_{max} для периода 2050 – 2059 гг. сравнивались с периодом 1990 – 1999 гг. для 43 створов на крупных реках России при негативном сценарии RCP8.5. Авторы отмечают, что для западных регионов России возможно уменьшение максимального дождевого стока на 10 – 20 %, а к середине XXI века возможен рост повторяемости максимальных паводков для створов гидроузлов на реках Сибири и Дальнего Востока.

Отдельного внимания заслуживает опыт применения различных региональных гидрологических моделей в целях оценки изменений стока рек в XXI веке. Такие модели можно считать более надежным инструментом вероятностного оценочного прогнозирования изменений водного режима рек, так как, в отличие от климатических, гидрологические модели способны в большей степени учитывать разнообразные механизмы формирования речного стока, рельеф, характер подстилающих пород и растительности, а также региональные особенности конкретного бассейна. В работе [Георгиевский, Шалыгин, 2012] применяли воднобалансовую модель ГГИ в целях оценки возможных изменений водного режима незарегулированных рек бассейна Волги в XXI веке при сценариях SRES-A2, B1, на основе которой показали возможное увеличение нормы годового стока на 5 – 25 % в первой трети XXI по сравнению с периодом 1946 – 1977 гг. с наибольшим относительным ростом в южной части бассейна Волги.

Применение воднобалансовой модели, разработанной в Институте Географии РАН для оценки возможных изменений стока Дона и Волги по двум ансамблям моделей климата и двум сценариям эмиссии парниковых газов CMIP-3 (SRES-B1 и SRES-A2) и CMIP5 (RCP2.6 и RCP8.5) показало, что для обеих рек возможен незначительный рост нормы годового стока в первой трети XXI века по сравнению с 1960 – 1990 гг. [Георгиарди и др., 2017; Георгиарди и др. 2020].

В последние десятилетия активное распространение получили различные методы оценки изменения гидрологических характеристик, в том числе стока, с помощью физико-математических моделей. В России широко применяются физико-математические модели SWAP и ECOMAG (Ecological Model by the land-surface model), которые использовались для оценки гидрологических последствий изменения климата в различных регионах России. Так, на основе модели ECOMAG и данных ансамбля моделей климата авторами было показано возможное существенное снижение нормы годового стока р. Оки к концу XXI века (на 18 – 22 %) [Kalugin, 2019]. Подобные результаты, прогнозирующие уменьшение годового стока рек в XXI веке при применении модели ECOMAG при сценариях RCP6.0 и RCP8.5 были получены и для р. Селенга [Морейдо, Калугин, 2017]. Применение данной модели по ансамблю глобальных моделей климата GCMs-CMIP5 для оценки изменения годового и максимального стока Лены в XXI веке позволило получить положительные аномалии годового стока для тридцатилетних периодов (2006 – 2035, 2036 – 2065, 2070 – 2099) по сравнению с аналогичным периодом 1971 – 2005 гг. [Gelfan et al., 2017; Гельфан и др., 2018].

Модель SWAP применялась для прогнозирования возможных изменений годового стока на р. Северной Двине, Колыме и Индигирке с использованием данных, полученных по модели климата Института вычислительной математики РАН при сценариях RCP4.5 и RCP8.5 для двух периодов (2026 – 2045 и 2081 – 2100 гг.) [Nasonova et al., 2018], р. Северная Двина, р. Таз и

р. Индигирка при сценариях RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5 [Nasonova et al., 2019]. В обеих работах ожидаются положительные аномалии нормы стока рек в будущем: от 10 до 23 % для р. Северная Двина, до 10 % для р. Таз, от 16 до 28 % для р. Колыма и от 12 до 34 % для р. Индигирка.

1.2 Существующие методы моделирования дождевых паводков

На сегодняшний день существует множество моделей формирования речного стока с различными областями применения. Несмотря на достаточно развитый инструментарий и большое количество исследовательских работ в этой области [Гельфан и др., 2020, Макарьева и др., 2018; Завьялова и др., 2018; Пряхина и др., 2017], моделирование стока с шагом по времени менее 1 суток проводится достаточно редко, что, наряду с дефицитом информации об осадках, ограничивает возможность использовать такие модели для описания паводков, в том числе быстроразвивающихся.

Повышение надежности результатов моделирования дождевых паводков невозможно без обеспечения их информацией об атмосферных осадках и адекватной оценки чувствительности моделей дождевого стока к данным об их количестве и интенсивности. За последние десятилетия применялись различные методы для получения пространственного распределения осадков на основе данных осадкомеров и характеристик водосбора [Haylock et al., 2008; Hofierka et al., 2002; Jeffrey et al., 2001]. Кобольд и Брилли [Kobold, Brilly, 2006] использовали модель HBV и часовые площадные данные о количестве осадков (интерполяционные данные по различным осадкомерам) для количественной оценки влияния неопределенности данных об осадках на Q_{max} половодья. Авторы обнаружили, что неточность в количестве осадков может привести к еще большей ошибке пиковых значений расходов воды. Бардосси и Дас [Bárdossy, Das, 2008] также изучали влияние данных об осадках на результаты гидрологического моделирования и обнаружили, что значения параметров модели, откалиброванных на основе разреженной и плотной информации об осадках, сильно различаются. Однако, в работах [Xu et al., 2013; Emmanuel et al., 2015] автора указали на то, что повышение плотности сети осадкомеров может улучшить эффективность моделирования, но значительного улучшения не наблюдается, когда количество осадкомеров превышает некоторое пороговое значение. Для первой работы, в которой исследовалась река Сяньян в центральном Китае с площадью водосбора около 100 тыс. кв. км пороговое значение было оценено в 1 осадкомер / 2500 кв.км.

В работе [Das et al., 2008] авторы сравнивали четыре различные типа моделей для расчета суточного стока и показали, что полураспределенные и полусосредоточенные модели превосходят сосредоточенные и распределенные и, предположили, что именно недостаток

пространственной информации является причиной низкой эффективности распределенных моделей. Лоближуа и др. [Lobligeois et al., 2014] обнаружили, что полураспределенные модели превосходят сосредоточенные модели в случае, когда наблюдается сильная пространственная изменчивость осадков в пределах моделируемого водосбора, и работают с аналогичной эффективностью, когда распределение осадков относительно однородно.

На реакцию водосбора реки на количество осадков также сильно влияет их временная изменчивость [Bárdossy, Pegram, 2016]. Так, в исследовании [Kobold, Brilly, 2006] обнаружили, что калибровка гидрологических моделей с субсуточными временными шагами может значительно повысить точность прогнозирования наводнений.

Следует отметить, что большое количество исследований посвящено именно изучению возможности улучшения пространственного или временного разрешения информации об осадках, но имеется некоторый дефицит исследований по количественной оценке и анализу динамических реакций водосбора на основе информации с различным временным и пространственным разрешениями осадков. Было выявлено, что пространственное и временное разрешение осадков по-разному оказывает влияние на эффективность модели, а также значения её параметров [Bruneau et al., 1995]. Так Буиж [Booij, 2002] показал, что влияние пространственного разрешения осадков больше, чем временного с точки зрения влияния на результаты моделирования Q_{max} . Меселе и др. [Meselhe et al., 2009] отметили, что физически основанные модели более чувствительны к пространственному и временному разрешению данных об осадках, чем концептуальные модели, а Чжу и др. [Zhu et al., 2018] обнаружили, что водосборы площадью от 2000 км² более чувствительны к пространственной изменчивости осадков, а на небольшие водосборы в большей степени влияет их временная изменчивость.

Модель SWAT — одна из немногих моделей, которая может усваивать высокодискретные данные об осадках (до 10 минут). Модель является одной из наиболее применяемых гидрологических моделей в мире [Van Griensven et al., 2012], возможно, в том числе вследствие того, что её код находится в свободном доступе, а сама модель тесно интегрирована с ГИС-пакетами. Несмотря на способность SWAT учитывать данные о количестве осадков с высоким временным разрешением, в большинстве предыдущих гидрологических исследований с помощью модели SWAT использовалась суточная дискретность. Ранее было проведено нескольких исследований, в которых оценивалось влияние временного разрешения входных данных об осадках на эффективность моделирования суточного стока, однако, они в основном проводились для небольших водосборов [Jeong et al., 2011], и их результаты были противоречивы. Так, Махарджан и др. [Maharjan et al., 2013] с помощью модели SWAT сравнивали результаты моделирования стока с небольшого сельскохозяйственного бассейна

(площадь водосбора 0,8 га) с различной временной дискретностью входных данных об осадках (15 минут, 2 часа, 6 часов и 12 часов). Авторы пришли к выводу, что лучшие результаты наблюдаются с повышением временного разрешения данных об осадках. Каннан и др. [Kannan et al., 2007], с другой стороны, обнаружили, что результаты моделирования суточного стока также небольшого водосбора (142 га) с использованием данных о суточных осадках были неизменно лучше, чем при использовании 30–минутных данных. В работе [Bauwe et al., 2017] также сравнивали результаты моделирования по данным об осадках с различным разрешением (5 мин, 15 мин, 30 мин и 60 мин) и пришли к выводу (в отличие от Махарджана), что никакого улучшения результатов за счет повышения разрешения данных об осадках не наблюдается; и нет необходимости использовать временной шаг осадков менее 60 минут, но отметили, что результаты могут зависеть от характеристик водосбора. Похожее исследование было проведено для крупного бассейна р. Хуайхэ Янгом и соавторами [Yang et al., 2016], которые выявили, что моделирование на основе суточных и часовых данных об осадках, в целом, приводит к схожим результатам, но пиковые значения расходов воды точнее воспроизводятся во втором случае.

В российской практике работы с использованием модели SWAT встречаются нечасто, однако география работ и постановка задач, для решения которых применялась эта модель, достаточно широка: моделирование гидрологического режима малых речного водосборов [Бугаец и др., 2018; Bugaets et al., 2019; Grek, Zhuravlev, 2020]; оценка водного баланса российской части бассейна р. Западная Двина [Terskii et al., 2019], оценка экспорта наносов и органического углерода в Северный Ледовитый океан: на примере бассейна реки Енисей [Fabre et al., 2019]; оценка возможного влияния будущих климатических изменений на гидрологический режим рек Западно-Сибирской низменности [Sada et al., 2019]. Во всех работах результаты моделирования показывали хорошую сходимость с наблюдаемыми гидрографами от малых до больших рек с различными условиями формирования стока. В работе [Бугаец и др. 2018] показано, что модель пригодна для расчета гидрологического режима рек умеренного пояса с преобладанием дождевых паводков, наилучшим образом она воспроизводит средние по водности годы и несколько занижает пиковые расходы, вызванные интенсивными осадками при ливнях и прохождении тайфунов. В работе, посвященной описанию опыта использования модели SWAT для бассейна Западной Двины помимо результатов моделирования водного баланса также приводится оценка чувствительности параметров модели и их калибровка для расчета речного стока с суточным и месячным временным разрешением, а также в очередной раз констатируется, что одна из основных проблем гидрологического моделирования в России - разреженная сеть измерений и множество пробелов в рядах данных [Terskii et al., 2019].

1.3 Использование радиолокационных данных для моделирования дождевых паводков

Для воспроизведения хода и определения характеристик дождевых паводков необходимо иметь полное представление о пространственном и временном распределении атмосферных осадков над всей площадью водосбора. Гидрологические модели требуют точных и репрезентативных метеорологических данных для лучшего воспроизведения расходов воды и, как следствие, более эффективного управления водными ресурсами [Sivasubramaniam et al., 2020, Beven, 2011]. Атмосферные осадки сильно изменяются во времени и пространстве, в связи с чем существует множество трудностей при их количественной оценке и пространственной интерполяции. Измерения атмосферных осадков *in situ* с помощью осадкомеров характеризуются наличием нескольких источников погрешностей, таких как потери на смачивание, испарение и конденсацию [Førland et al., 1996, Taskinen, Söderholm, 2016]. Помимо этого, для получения достоверных и репрезентативных данных гидрологического моделирования определенного водосбора сеть осадкомеров должна быть плотной. Для малых и средних водосборов данные осадкомеров, расположенных за их пределами, зачастую не могут использоваться для оценок пространственного распределения осадков на водосборе [Sivasubramaniam et al., 2020].

Исследования, проведенные Монтесархио с соавторами показывают, что качество моделирования речного стока является функцией от количества метеостанций [Montesarchio et al., 2015]; авторы утверждают, что удовлетворительные результаты моделирования можно получить только при плотности сети 6 и более метеостанций (мс) на 1 тыс. км², что значительно превышает плотность, рекомендованную Всемирной метеорологической организацией (1мс / 575 и 250 км² для равнинной и горной территории) [WMO, 1994]. Согласно Автоматизированной системе управления наблюдательными подразделениями Росгидромета asunp.meteo.ru (Наблюдательная сеть: количество станций, постов, пунктов наблюдений по состоянию на 2022-03-15), количество метеорологических и агрометеорологических станций и постов составляет 4982 единицы, что соответствует средней плотности 1 мст/3450 кв.км. Учитывая современное состояние гидрометеорологической сети России [Обзор деятельности Росгидромета..., 2020] и перспективы ее развития, направленные скорее на автоматизацию, чем на расширение сети, представляется, что в обозримой перспективе необходимый уровень плотности сети для удовлетворительного моделирования дождевого стока достигнут не будет. Таким образом, использование лишь данных наземных наблюдений за атмосферными осадками недостаточно ни для понимания картины их распределения, ни для информационного обеспечения гидрологического моделирования.

В настоящее время проводится множество исследований в области гидрологии и метеорологии, основанных на использовании радиолокационных данных. Согласно Фасснахту

[Fassnacht et al., 2003], использование радиолокационных данных позволяет получить достоверную информацию о пространственном распространении атмосферных осадков, в то время как данные с сети осадкомеров могут обладать пространственной неоднородностью и вызывать ошибки в моделировании. Исследование [Noh et al., 2016] делит возможности использования радиолокационных данных на два основных аспекта. Первый связан с использованием радиолокационных данных для анализа текущего состояния атмосферных осадков. Второй аспект связан с использованием сеток радиолокационных измерений для прогнозирования паводков.

Использование радиолокационных данных для целей прогнозирования дождевых паводков уже давно применяется за рубежом. В работах [Looper, Vieux, 2012; Cole, Moore, 2009; Atencia et al., 2011] авторы отмечают недооцененный потенциал радиолокационных данных для гидрологии, а также указывают на их преимущества перед традиционной метеорологической сетью. Так, в работе Германа и др. было отмечено, что использование радиолокационных данных позволяет уменьшить среднюю погрешность моделирования с 29 % до 16 % [Germann et al., 2009].

Использование радиолокационных данных ограничено некоторыми особенностями, приводящими к ошибкам (аппаратная калибровка, затухание, шумы, аномальное распространение, вертикальная отражательная способность, ZR -отношение и др.). Коррекция данных ошибок при использовании радиолокационных данных исследовалась многими авторами [Harrold et al., 1974, Browning 1978, Wilson, Brandes 1979, Fabry et al., 1994, Kitchen 1997, Krajewski, Smith 2002, Rico-Ramirez et al., 2007].

Чжу с соавторами [Zhu et al., 2014] показали в своей работе, что радиолокационные данные могут быть использованы для моделирования речного стока наравне с осадкомерными данными в случае равномерного распределения атмосферных осадков. При высокой интенсивности и неоднородном распределении были отмечены некоторые сложности в интерпретации результатов моделирования по радиолокационным данным, которые связаны со свойственными проблемами технологий метеорологических локаторов, описанными выше.

В работе Шуурманса и Биркенса [Schuurmans, Bierkens, 2007] на основе густой сети осадкомеров (1 станция на 4 км²) с использованием радиолокационной информации было показано, что даже для малого бассейна площадью 135 км² с плоским рельефом (перепад высот составляет менее 5 метров) изменчивость годовых сумм осадков может превышать 15 %. Констатируя безальтернативность радиолокационным данным, исследователи подчеркивают, что их наибольшая эффективность была достигнута при моделировании экстремального стока.

Множество исследований посвящено разработке методов гидрологического моделирования, позволяющих эффективнее использовать радиолокационные данные с целью улучшения результатов прогнозирования. Так, одной из главных задач проекта по сравнению распределенных моделей DMIP [Smith et al., 2004] была разработка методов использования радиолокационных данных локаторов NEXRAD [Next-Generation Radar, Smith et al., 1996] для улучшения прогнозирования речного стока Национальной метеорологической службы США с использованием уже имеющихся гидрологических моделей. Было показано, что результаты моделирования больше зависят от формирования модели, параметризации и навыков модельера, нежели чем от метода описания пространственной структуры данных.

Радиолокационные данные также активно применялись ранее для целей гидрологического моделирования при использовании модели SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Ди Луцио и Арнольд [Di Luzio, Arnold, 2004] использовали радиолокационные данные локатора NEXRAD Stage III в модели SWAT как часть проекта Distributed Model Intercomparison Project (DMIP) с целью выполнить моделирование суточного стока. Использовали модель SWAT и данные однополяризационного локатора CAPPI (Constant Altitude Plain Position Indicator) в работе [Jeong et al., 2014] с целью определения оптимального размера сетки отражаемости локатора, и как результат моделирования стока предложили оптимальный размер сетки для бассейна 4 – 8 км. Помимо этого, модель SWAT применялась для сравнения расхода стока, полученного с помощью локаторов NEXRAD и данных осадкомеров [Sexton et al., 2010, Price et al., 2014]. Данные исследования показали, что радиолокационные данные могут успешно использоваться для бассейнов, где количество осадкомеров недостаточно.

Некоторые исследования [Lowe et al., 2014] указывают на необходимость использования радиолокационных данных, корректируемых по показаниям наземных метеостанций, что приводит к повышению качества гидрологических расчетов и прогнозов.

Таким образом, результаты анализа научной литературы позволяют сделать вывод о том, что использование радиолокационных данных об атмосферных осадках является одним из наиболее перспективных средств повышения качества моделирования речного стока с помощью моделей «осадки–сток». Особенно высокую пользу радиолокационные данные могут принести при моделировании и прогнозировании быстроразвивающихся паводков.

Предыдущие исследования показывают разные результаты в оценке применимости радиолокационных данных для целей гидрологии в зависимости от типа радиолокационных данных, региона исследования и его размеров, а также примененной гидрологической модели. Однако в большинстве исследований моделирование стока проводилось либо для короткого периода, либо для длительного (от месяца до сезона). И только некоторые исследования касались

изучения применимости радиолокационных данных для оценки многолетнего речного стока для целей управления водными ресурсами.

Необходимо отметить, что для большинства работ была характерна густая метеорологическая сеть на исследуемых территориях. Так, например, в работе [Morin et al., 2005] было использовано 74 осадкомера, в то время как в другом исследовании [Noh et al., 2016] только 7, и большая часть из них расположена в пределах выбранных водосборов.

1.3.1 Комбинирование наземных и радиолокационных данных

Измерения на метеорологических станциях дают точную информацию, но плотность их размещения недостаточна для моделирования дождевых паводков, вызванных ливневыми осадками. В то время как метеорологический локатор предоставляет пространственно-распределенные оценки осадков с высоким пространственным и временным разрешением, из-за большого количества источников ошибок и разницы в высоте наблюдения измерения, полученные с помощью радиолокационного метода, часто не соответствуют реальной картине, наблюдаемой на земле. Так, отдельные исследования, занимавшиеся сравнением радиолокационных и наземных данных об атмосферных осадках, указывают на существование некоторого смещения в оценках радиолокационных осадков. В работе Скиннера [Skinner et al., 2009] говорится о завышении небольших осадков и занижении больших слоев локатором, в другой работе [Borga et al., 1995] отмечено явное смещение вниз значений измерений метеорологических локаторов по сравнению с измерениями на метеостанциях. Всё это указывает на необходимость выявления и учета такого смещения до применения радиолокационных данных в гидрологическом анализе.

Путем объединения или комбинирования наземных и радиолокационных (повторной калибровкой) можно улучшить соответствие данных метеорологических локаторов и наземных измерений без потери пространственной информации. Существует большое количество методов по комбинированию радиолокационных и наземных измерений осадков основные различия, в которых заключаются в применяемых методах интерполяции, включая геостатистические и детерминированные. Наиболее распространёнными в настоящее время являются следующие:

Среднее смещение поля (Mean Field Bias, MFB). MFB определяет среднее мультипликативное смещение между радиолокационной оценкой и наблюдаемыми осадками. Главное отличие данного метода от других заключается в расчёте смещения для всего радиолокационного поля, не меняющегося в пространстве, вследствие чего метод не учитывает локальные особенности атмосферных осадков [Smith, Krajewski, 1991].

Кригинг с внешним дрейфом (Kriging with External Drift, *KED*). В методе *KED* используется вторичная переменная для комбинирования [Ahnert P., 1986]. На основе модели линейной регрессии между наземными и радиолокационными данными вычисляются коэффициенты тренда, и уже разница между значением тренда и данными осадкомеров принимается за невязку, которая с помощью кригинга интерполируется в искомые точки. Комбинирование данных происходит путем суммирования полей невязок и радиолокационных оценок осадков.

Метод интерполяции невязок. Суть метода интерполяции невязок, в отличие от предыдущего, заключается в пространственной интерполяции прямой разницы между наземными и радиолокационными измерениями количества осадков [Попов, 2018]. Одним из преимуществ такого способа комбинирования данных является возможность использования различных типов интерполяторов.

Существуют также мультипликативный и смешанный способы комбинирования (Multiplicative and Mixed algorithm) [Pfaff, 2010], где для интерполяции пространственно изменяющийся поправки применяется метод ординарного кригинга (ordinary kriging).

Большое количество работ посвящено выбору оптимального метода комбинирования наземных и радиолокационных данных, однако, одними из определяющих факторов являются количество наземных пунктов наблюдений, орографические особенности и уровень вычислительных мощностей компьютера для того или иного типа интерполятора [Попов, 2018]. Так, в диссертации Попова В.Б. было показано, что метод кригинга с внешним дрейфом подходит только в случаях стабильной калибровки по крайней мере на протяжении нескольких сезонов так как основан на статистической связи между данными осадкомера и локатора, которая может быть не только неудовлетворительна, но и различна из года в года. В работе Гуденхофта [Goudenhoofdt, 2009], где проводилось сравнение методов комбинирования радиолокационных и станционных данных для суточных сумм осадков было показано, что методы *MFB*, *KED* снижают средние абсолютные ошибки на 40 и 25 %, соответственно, однако, было уточнено, что эффективность геостатистических методов интерполяции сильно зависит от плотности наземной сети, а для простых методов влияние количества наземных пунктов довольно мало.

В работах [Goudenhoofdt, Delobbe, 2009; Wang et al., 2013; Silver et al., 2019; Ochoa-Rodriguez et al., 2019] проведено сравнение большого количества методов комбинирования и интерполяции. Почти все авторы сходятся во мнении, что кригинг с внешним дрейфом (*KED*), как правило, наиболее эффективный метод интерполяции, и является наиболее часто используемым способом комбинирования радиолокационных и наземных данных, однако, в некоторых случаях, метод интерполяции невязок совместно с интерполятором *IDW* (метод

обратных расстояний) [Ware, 2005; Braxton, 2006] показывают наименьшие значения среднеквадратического отклонения.

1.4 Исследования дождевых паводков на Валдае

За всю историю Валдайского филиала ГГИ (ВФ ГГИ) на её базе проводились многочисленные исследования, охватывающие практически все звенья гидрологического цикла, результаты которых получили прямое применение в разработках расчетных методов инженерной гидрологии. Основные направления можно объединить в несколько групп: воднобалансовые исследования малых речных водосборов, исследования влияния различных условий подстилающей поверхности на водный режим и исследования русловых процессов.

Одним из наиболее важных направлений являются исследования формирования дождевых паводков. На базе ВФ ГГИ организовывались экспериментальные наблюдения на водосборах и стоковых площадках для изучения режима и взаимосвязи поверхностного и подземного стока, создана сеть ливнемерных пунктов, в том числе для анализа наблюдаемых паводков, проводились полевые и лабораторные эксперименты для изучения процессов участвующих в формировании стока дождевых паводков [Экспериментальные ..., 1953]. Существенным блоком экспериментальных исследований на Валдае являются исследования, связанные с изучением влияния различных факторов подстилающей поверхности на характеристики речного стока и структуру водного баланса бассейнов малых и средних рек, в первую очередь на р. Полометь. Так, сравнение численных параметров стока на полностью залесенном и полевого логов Таежного и Усадьевского показало, что залесенность уменьшает максимальные расходы половодий в 2 – 3 раза и максимальных расходов дождевых паводков в 3 – 5 раз [Формирование стока воды..., 1979]. Такие результаты разительно отличаются от выводов, изложенных в рекомендациях и действовавших СП, где указывается отсутствие связи между залесенностью и обеспеченными максимумами стока дождевых вод. Накопленные многолетние данные по стоку с малых экспериментальных водосборов и речных бассейнов с различной степенью залесенности Валдайского филиала ГГИ показали значительное водорегулирующее и водоохранное влияние залесенности подстилающей поверхности [Копалиани, Марков, 2005]. Многочисленные работы О.И. Крестовского, С.Ф. Федорова и С.В. Марунича показали, что наиболее значительные изменения гидроклиматических параметров происходят при проведении лесохозяйственных мероприятий, что приводит к изменению структуры суммарного испарения с рек и речного стока.

Другой значимой частью работ по экспериментальным исследованиям на ВФ ГГИ является изучение физических закономерностей формирования стока рек, в частности экспериментальные стоковые исследования по инфильтрации воды в грунт. В работах Е.М. Гусева было показана

решающая роль вариации значений инфильтрации в изменениях стока река по сравнению с другими физическими факторами [Гусев, 1978; Гусев, 1980]. Проводились экспериментальные работы по естественному и искусственному дождеванию с целью определения причин, обуславливающих потери дождевого стока. Оценивалось влияние на инфильтрацию таких факторов как интенсивность и продолжительность осадков, физико-механические свойства почв, наличие почвенного воздуха, состояние начальной влажности почвы, а также уклона [Федоров, 1954].

Особой ценностью отличались исследования, касающиеся точности вычислений и изменчивости значений слоя осадков для различных периодов времени. Для решения таких задач на базе ВФ ГГИ была создана ливнемерная сеть, расположенная на площади около 7000 км² и включающая в себя в разные годы 80 – 90 дождемерных пунктов, треть из которых представляли самописцы. Основным результатом исследования — это определенное в ходе работ значение минимальной плотности сети для вычисления слоя осадков с допустимой погрешностью для временных интервалов от конкретного дождя до сезона [Козлов, Зыков, 1954].

В Валдайском филиале ГГИ также проводились подробные исследования особенностей речного стока со склонов. Было организовано 16 оборудованных стоковых площадок для наблюдений, где выполнялись не только измерения стока рек, но и за отдельными элементами водного баланса (снегозапасы, влагозапасы зоны аэрации, процессы промерзания и оттаивания, уровни грунтовых вод). Помимо этого, проводились детальные эксперименты по изменению условий стока – возделывание различных сельскохозяйственных культур, продольная и поперечная распашка, искусственное изменение увлажнения грунтов и др. [Сток и потери талых вод..., 1968].

Немалая часть исследований на объектах ВФ ГГИ была посвящена изучению эрозионных процессов, на основе которой были разработаны методики наблюдений и расчета эрозии почвы на склоновых землях [Лидов и др., 1973].

Особое внимание уделялось наблюдениям за основными элементами водного баланса. Для изучения процесса испарения с водной поверхности, суши, и различных сельскохозяйственных культур создавались специальные испарительные площадки [Испарение в природе, 1968], а также осадкомерные полигоны для детального изучения работы различных типов приборов и установок с целью оценки точности учета жидких и твердых осадков [Голубев, Симоненко, 1996; Голубев и др., 1999; Голубев и др., 1997].

1.4.1 Опыт применения радиолокационных данных для речных водосборов

В Государственном гидрологическом институте (ГГИ) и его Валдайском филиале (ВФ ГГИ) исследования в области применения радиолокационной информации для гидрологических целей начали проводить еще в конце 70-х годов прошлого столетия, когда на территории Валдайской научно-исследовательской гидрологической лаборатории был введен в эксплуатацию МРЛ–2 (1978 г.).

В работах [Кондратьев, 1983; Капотова, 1986] были предприняты попытки расчета дождевых паводков по данным радиолокационных измерений осадков. В качестве экспериментального бассейна был выбран водосбор р. Полометь створ с. Дворец (432 км²). Выбор р. Полометь объяснялся хорошей изученностью бассейна, наличием уже на тот момент многолетних наблюдений за стоком и метеорологическими элементами, а также был освящен достаточно густой наземной осадкомерной сетью. На основе этих исследований была разработана и предложена схема оперативного прогноза дождевого стока сначала для верхнего течения (створ д. Дворец) [Ливанова, 1984], потом для замыкающего створа р. Полометь с общей площадью водосбора 2208 км² (створ с. Лычково) [Беккер, 1988]. Для решения поставленных задач была разработана математическая модель речного бассейна р. Полометь с учетом особенностей строения и формирования стока. В основу взята гидродинамическая модель формирования дождевого стока, которая была апробирована на материалах наблюдений за стоком со соковых площадок и логов, расположенных в разных физико-географических условиях [Капотова, Кондратьев, 1983]. Модель состояла из четырех блоков, описывающих основные стокообразующие процессы: поверхностный сток, инфильтрацию, подповерхностный сток и русловую трансформацию паводочной волны.

Разработанная модель водосбора р. Полометь позволяла использовать в качестве входной информации радиолокационные данные, полученные с помощью радиолокатора МРЛ–2, предоставляющий информацию о поле осадков с разрешением 3 x 3 км в радиусе 100 км. Для уточнения значений параметров A и b ZR -отношения использовались независимые материалы наблюдений контрольного полигона в бассейне за период с 1979 – 1981 гг. Значения параметров A и b принимались постоянными по площади и по времени и были приняты соответственно равными 250 и 1,5. Так было показано, что метод радиолокационного измерения осадков при единых параметрах ZR -отношения недостаточно качественно описывает поле осадков (завышение слоев осадков, измеренных локатором, в восточной части водосбора), что существенно сказывается на результатах расчета гидрографа стока по модели.

В разработанной схеме оперативного прогноза использовался радиолокационный метод прогноза осадков, который состоял в определении центра тяжести ливневого очага по данным о

слоях осадков в каждой ячейке локатора, а также смещения этого центра и будущего его положения путем экстраполяции. Развитие очагов не прогнозировалось, а заблаговременность составляла не более 6 часов. Результаты прогнозов расходов воды, полученные с использованием различных методов прогноза осадков, в том числе радиолокационного, в целом показали между собой несущественную разницу, однако, метод, основанный на совместном использовании краткосрочной прогностической информации об осадках и радиолокационных данных показал лучшее соответствие рассчитанных и наблюдаемых гидрографов.

1.5 Глобальные реанализы как источники гидрометеорологических данных

В настоящее время все более широкое распространение в метеорологии и гидрологии приобретают архивы реанализа [Насонова и др., 2015; Терский, Кулешов, 2018; Миллионщикова, 2019]. Реанализ объединяет прошлые наблюдения с моделями для создания последовательных временных рядов по нескольким климатическим переменным. Эти данные могут быть использованы при решении как фундаментальных [Сутырина, 2018], так и прикладных задач [Казачук, Терский, 2018; Айзель и др., 2020]. Данные реанализа имеют глобальный охват и, используя модель прогноза погоды, они ассимилируют наблюдения из самых разных источников (метеостанции, радиозонды, самолеты, спутники, буи, корабли и т.д.) [Гавриков, 2019]. Наиболее часто данные реанализа используют для гидрологического моделирования в регионах, где распределение метеостанций разрежено или вовсе отсутствуют.

Ключевые характеристики реанализов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные характеристики метеорологических реанализов

Название	Период данных	Масштаб	Разрешение	
			пространственное	временное
JRA 55 (The Japan Meteorological Agency)	1958 – наст. время	global	1,25x1,25 ⁰	3 ч.
ERA5 (Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF))	1979 – наст. время	global	0,25x0,25 ⁰	1 ч.
ERA-Interim (ECMWF)	1979 – 2019	global	~ 0,7x0,7 ⁰	6 ч.
NCEP (Национального центра прогнозов окружающей среды (CFSR))	1979 – 2010	global	0,3x0,3 ⁰	6 ч.
NCEP (CFSRv2)	2011 – наст. время	global	0,2x0,2 ⁰	6 ч.
UERRA	1961 – 2019	regional	5,5x5,5км	6 ч.

Однако данные, полученные в результате ассимиляции, являются лишь оптимальной оценкой полей метеорологических величин. Данные непосредственных измерений принято считать более достоверными.

Несмотря на то, что радиолокационные данные обладают пространственной информацией об осадках, они крайне редко используются в качестве основы для создания глобальных реанализов. Чаще они используются для подготовки сеточных архивов с высоким разрешением для конкретных регионов или географических объектов [Paulat et al., 2008; Erdin et al., 2012; Zhang et al., 2016], или для повышения временного разрешения (до часа) уже созданных на основе суточных данных архивов [Isotta et al., 2015].

Совместно с развитием новых продуктов метеорологического реанализа разрабатываются и реанализы речного стока (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Основные характеристики реанализов речного стока

Название	Период данных	Масштаб	Модель	Разрешение	
				пространственное	временное
E-run	1950 – 2015	global	machine learning	0,5x0,5 ⁰	месяц
R5	1979 – 2016	region	GR4J	0,5x0,5 ⁰	24 ч.
GloFAS-ERA5	1979 – наст. время	global	LISFLOOD	0,1x0,1 ⁰	24 ч.

Глава 2 Современные изменения характеристик дождевых паводков исследуемого региона

2.1 Физико–географическая, климатическая и гидрологическая характеристика, изученность района исследования

Рассматриваемая территория расположена на северо–западе европейской части России, ограничена Ленинградской, Новгородской и Псковской областями, граничит с Белоруссией, а также со странами Европейского союза – Эстонией и Латвией. Площадь территории составляет около 193 800 км².

2.1.1 Климат

Рассматриваемая территория находится в умеренном климатическом поясе. Формирование климата происходит под воздействием морских и континентальных воздушных масс умеренных широт, частых вторжений арктического воздуха и активной циклонической деятельности. Главные особенности местного климата — высокая влажность воздуха, умеренное влажное и теплое лето и довольно продолжительная и умеренно холодная зима, сопровождающаяся частыми оттепелями.

Климатические характеристики территории формируется под влиянием двух факторов – радиационного режима и циркуляции атмосферы. Во все сезоны года здесь преобладают ветры юго–западного и западного направлений, несущие влажный воздух Атлантики. Вторжение воздушных масс Атлантики сопровождается ветреной пасмурной погодой.

К местным факторам, влияющим на температурный режим, является близость крупных водоемов, таких как Ладожское озеро и Финский залив Балтийского моря. Влияние масс воздуха атлантического происхождения и водных бассейнов на температуру воздуха данной территории проявляется в сглаживании различий между температурой воздуха в январе и феврале, а также в уменьшении ее годовой амплитуды.

Среднегодовая температура воздуха, рассматриваемого района, полученная из среднемесячных значений за многолетний период наблюдений, равна 3,7 °С.

Средние многолетние температуры воздуха по данным различных метеостанций в регионе приведены в таблице 2.1, экстремальные значения температуры воздуха – в таблице 2.2. Для климата региона характерны резкие перепады температуры воздуха как внутри суток, так и в течение нескольких суток.

Самым холодным месяцем на большей части территории является январь, температура которого колеблется от -8 в западной до -11 °С в восточной части области, довольно близка к нему температура февраля, который является самым холодным месяцем на Карельском перешейке. Самым жарким месяцем является июль, с температурой $16 - 17$ °С.

Таблица 2.1 – Средние многолетние значения температуры воздуха (°С) по данным различных метеостанций

Пост	Х-ка	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Николаевское	средн.	-8,3	-8	-3,6	3,6	10,5	14,7	17	15,2	10,2	4,4	-0,9	-5,6	4,1
	мин.	-11,8	-11,7	-7,8	-0,8	4,9	9,2	11,7	10,5	6,2	1,5	-3,2	-8,4	0
	макс.	-5,5	-5	0,2	8,1	15,9	19,9	22,1	20,4	14,8	7,5	1,4	-3,1	8,1
Санкт-Петербург	средн.	-7,8	-7,8	-3,9	3,1	9,8	15	17,8	16	10,9	4,9	-0,3	-5	4,4
	мин.	-10,7	-11	-7,2	-0,3	5,5	10,8	13,8	12,5	7,8	2,7	-2,3	-7,3	1,2
	макс.	-5,1	-4,8	-0,3	7,2	14,5	19,4	22	20,1	14,5	7,5	1,6	-2,6	7,8
Белогорка	средн.	-9	-8,9	-4,5	2,7	9,7	14,3	16,7	15,1	9,8	4,1	-0,9	-5,8	3,6
	мин.	-12,6	-13,1	-9,1	-1,5	4	8,5	11,2	10,1	5,9	1,3	-3,2	-8,8	-0,6
	макс.	-5,9	-5,2	0,2	7,6	15,5	20	22,1	20,4	14	7,3	1,2	-3,2	7,9
Новая Ладога	средн.	-9,1	-9,1	-5,2	2,5	9,2	14,5	17,3	15,7	10,4	4,4	-1,2	-6,1	3,6
	мин.	-12,6	-12,2	-8,5	-1	5	10,3	13	11,8	7,2	2,2	-3	-8,6	0,3
	макс.	-6,2	-5,5	-0,6	6,8	13,8	19,1	21,8	20,3	14,5	7,4	1,4	-3	7,5
Тихвин	средн.	-10,5	-9,3	-4,7	2,8	9,7	14,7	16,6	14,8	9,5	3,6	-1,8	-6,6	3,2
	мин.	-14,4	-13,4	-9,6	-1,8	3,4	8,4	10,6	9,5	5,3	0,6	-4,3	-9,6	-1,3
	макс.	-7,1	-5,5	0,2	7,9	15,7	20,6	22,5	20,6	14,5	6,8	0,4	-3,9	7,7
Свирица	средн.	-9,8	-9,7	-5,7	1,9	8,9	14,1	16,9	15,2	10	4	-1,6	-6,7	3,1
	мин.	-13,6	-14	-10,4	-1,9	4,3	9,5	12,1	10,6	6,1	1,2	-3,8	-9,7	-0,8
	макс.	-6,5	-6	-1	6,4	14,1	19,3	21,8	20,2	14,1	7	1,1	-3,4	7,1

Распределение абсолютных максимумов по территории более сглажено, что можно объяснить особенностями циркуляции в разные полугодия. Низкие температуры отмечаются при выносах холодных арктических масс при ослаблении турбулентности в ясные тихие ночи.

Характерной особенностью холодного периода являются оттепели. В начале и середине зимы они, как правило, имеют адвективное происхождение, в конце – радиационное. Среднее число дней с оттепелью составляет: в декабре – 12; в январе – 7,7; в феврале – 6,3, а в марте – 15,8.

Весна в регионе – часто затяжная. Средняя суточная температура переходит через 0 °С 3 апреля, через 10 °С – 18 мая. В течение 127 дней средняя суточная температура выше 10 °С.

За последние годы циклоническая деятельность активизировалась, что особенно характерно для холодного периода. Начиная с 1980 года (последние 25 лет) средняя годовая

температура воздуха возросла на 1,2 °С по сравнению с нормой (4,4 °С) прежде всего за счет более высоких средних месячных температур с января по март. Температура самого теплого месяца (июля) осталась на уровне нормы (16,7 °С). На фоне такой тенденции наблюдаются периоды с аномально холодной погодой зимой. Например, в 2002 г. средняя температура декабря составила – 9,7 °С, а средняя температура июля – +25,1 °С.

Таблица 2.2 – Распределение экстремальных значений температур воздуха (°С) по данным различных метеостанций

Пост	Х-ка	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Николаевское	абс.мин.	-40	-40	-32	-19	-8	-4	3	-1	-6	-17	-25	-41	-41
	абс.макс.	7	6	15	27	31	31	34	33	28	21	13	10	34
Кингисепп	абс.мин.	-43	-41	-33	-26	-7	-3	3	0	-7	-12	-26	-40	-43
	абс.макс.	6	6	14	25	30	31	32	32	29	21	12	9	32
Санкт-Петербург	абс.мин.	-36	-35	-29	-18	-6	0	5	1	-3	-13	-22	-34	-36
	абс.макс.	6	6	13	25	31	32	34	34	29	21	12	9	34
Белогорка	абс.мин.	-42	-43	-33	-28	-8	-2	1	0	-7	-18	-27	-44	-44
	абс.макс.	6	6	14	26	30	32	34	34	28	20	12	9	34
Новая Ладога	абс.мин.	-44	-43	-32	-25	-11	-1	-4	2	-4	-12	-24	-41	-44
	абс.макс.	7	5	14	25	32	33	34	33	29	21	12	10	34
Тихвин	абс.мин.	-51	-41	-35	-26	-9	-3	0	-2	-9	-18	-29	-44	-51
	абс.макс.	6	5	14	27	30	32	35	36	29	21	12	9	32
Свирица	абс.мин.	-48	-51	-36	-28	-9	-3	3	-2	-6	-18	-28	-44	-48
	абс.макс.	5	5	11	25	29	32	34	33	28	20	12	7	34

Территория исследования по своему географическому местоположению относится к зоне избыточного увлажнения. В течение года осадки выпадают неравномерно: большая их часть (67 %) приходится на теплый период и лишь 33 % – на холодный. Интенсивная циклоническая деятельность определяет режим осадков в течении года и даже летом, когда она ослабевает, осадки внутримассового характера составляют незначительную часть. Распределение осадков по территории довольно равномерно, плавно уменьшаясь в северо-восточном направлении. Орографические особенности определяют изменение осадков от 550 мм/год на Приладожской низменности до 700 – 800 мм на Лодейнопольской возвышенности. В среднем по региону выпадает 650 мм в год. В годовом ходе минимум наблюдается в феврале–марте, иногда в июле.

По многолетним данным, в Санкт–Петербурге минимум наблюдался в марте в 30 % случаев, в феврале – в 16 %, и примерно в 5 % – в июле; максимум отмечается в августе в 41 % лет, в июне–июле в 16 и 19 % лет, соответственно [Климат Санкт–Петербурга...]. Над водоемами годовой ход осадков сильно сглажен по сравнению с прибрежными районами. Характеристики средних сумм осадков (мм) по данным различных метеостанций приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Месячное и годовое количество жидких (Ж), твердых (Т) смешанных (С) осадков (мм)

Пост	Осадки	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Санкт–Петербург	Ж	2	1	2	18	41	62	68	82	65	41	14	6	402
	Т	26	24	19	10	–	–	–	–	–	5	16	20	120
	С	10	10	11	10	5	–	–	–	1	12	21	18	98
Тихвин	Ж	2	1	3	20	45	73	79	78	72	47	13	5	438
	Т	27	26	24	7	–	–	–	–	–	8	20	23	135
	С	9	7	9	19	4	–	–	–	1	14	23	18	104
Свирица	Ж	1	–	3	15	34	53	67	70	72	44	15	8	382
	Т	32	29	26	9	1	–	–	–	–	6	22	25	150
	С	10	9	8	13	5	1	–	–	2	13	25	18	104

Средняя годовая амплитуда осадков (разность между наибольшей и наименьшей месячной суммой) колеблется по территории от 30 до 60 мм, а в некоторых случаях даже больше 60 мм. Изменение по территории сумм осадков в месяцы холодного периода года меньше, чем в месяцы теплого.

Вследствие развития циклонической деятельности наибольшее за год количество осадков выпадает в летний период – 66 % (IV – X мес.), в холодное время года (XI – III мес.) – 34 % от общего количества осадков. Изменчивость месячных сумм осадков из года в год, довольно велика, особенно в теплый период. В зависимости от условий атмосферной циркуляции в отдельные годы месячные количества осадков значительно отличаются от многолетних средних сумм. Так, например, в Санкт–Петербурге в августе 1933 г. выпало 253 % от месячной нормы осадков, а в августе 1955 г. – немногим более 1 % от нормы. Большая часть осадков выпадает в жидком виде (60 – 70 %), на твердые осадки приходится 25 – 30 %, остальная часть – смешанные осадки.

Летние суточные максимумы осадков, как правило, являются наивысшими в году. Наиболее обильные ливневые осадки характерны для июля и августа. Летние осадки отличаются большей изменчивостью. Например, в мае наблюдаемые месячные максимальные значения осадков составляют 199 мм, минимальные – 7 мм, в августе – 181 и 4 мм, соответственно.

Снежный покров появляется первый раз в конце октября – начале ноября, устойчивый снежный покров образуется в последних числах ноября – первой декаде декабря. Самое раннее появление снега происходит на северо–востоке и востоке области (для метеостанций Свирица и Тихвин – 26 октября и 25 октября, соответственно). Разрушается устойчивый снежный покров в последних числах марта – первой половине апреля. Раньше всего это происходит на метеостанции Кингисепп и Санкт–Петербург (31 и 30 марта соответственно). Окончательно снег сходит во второй половине апреля (таблице 2.4).

Таблица 2.4 – Высота снежного покрова (Санкт–Петербург), см

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Средняя	24	31	30	10	3	11	18
Максимальная	63	68	73	53	16	38	56

2.1.2 Рельеф

Исследуемая территория по характеру рельефа разделяется на две части: северо–западную – низменную, расположенную в пределах Прибалтийской низменности и восточную, юго–восточную и южную – возвышенную. Прибалтийская низменность – слабоволнистая равнина, на которой отчетливо выделяется ряд возвышенностей и понижений, абсолютные отметки, которой колеблются от 50 до 100 м, наиболее значительные возвышения могут достигать 200 – 300 м. К ним относятся: Силурийское плато в центральной части Ленинградской области, Лужская возвышенность, расположенная к северо–востоку от г. Пскова.

Силурийское плато представляет собой плоскую возвышенную равнину, вытянутое в направлении от р. Нарвы до р. Сяси. Западная часть его носит название Ижорское плато и является наиболее обширной и приподнятой. Здесь в известняках и доломитах ордовика широко развит карст.

Возвышенности – Лужская, Судомская и Бежаницкая – это меридиональный пояс краевых ледниковых образований, соответствующий различным стадиям валдайского оледенения в виде чередования конечноморенных холмов, гряд и камовых холмов с относительными высотами до 100 – 125 м.

Понижения рельефа представляют собой обширные низменности с абсолютными отметками от 0 до 50 м. Прибалтийская низменность пересечена густой сетью рек, расходящейся в различных направлениях. Характерно развитие болот в низинах и на плоских междуречных пространствах. Долины рек, как правило, врезаются неглубоко, и только при пересечении склонов водораздельных возвышенностей они врезаются на глубину от 20 до 40 м, иногда более 50 м.

Возвышенная часть территории исследования расположена в пределах Валдайской возвышенности, которая опоясывает Прибалтийскую низменность и простирается от восточного берега Онежского озера до г. Великие Луки. Абсолютные отметки поверхности могут составлять 150 – 200 м, а максимальные достигают в районе г. Валдай 320 м. Карбоновый уступ отделяет Валдайскую возвышенность от Прибалтийской низменности, который представляет собой выположенный склон шириной от 5 до 30 км и высотой до 70 – 100 м, изрезанный многочисленными глубокими долинами рек, дренирующими водоносными горизонтами [Ресурсы поверхностных вод..., 1965].

2.1.3 Почвы

Обусловленное положением в зоне с холодным и влажным климатом и преобладанием лесной, преимущественно хвойной растительностью основными процессами почвообразования на территории Северо–Запада являются подзолообразование и заболачивание. Почвообразующей породой являются моренные отложения, имеющие различный состав – от песков до глин.

Широкое распространение имеют дерново–подзолистых и дерново–карбонатные почвы на карбонатных валунных суглинках в бассейне реки Луги. В центральной части и низовье бассейна встречаются заболоченные почвы. Для северной части Псковской области характерно сочетание подзолистых и заболоченных почв с механическим составом от песчаных до легких суглинков. Для южной части области характерен более тяжелый механический состав и меньшая оподзоленность.

В Новгородской области наиболее распространены дерново–подзолистые и все разновидности подзолистых почв. Юго–западная часть Приильменской низины преимущественно сложена карбонатно–валунными суглинками, распространены дерново–карбонатные почвы, отличающиеся развитым перегнойным горизонтом, отсутствием подзолистого горизонта и тяжелым механическим составом. На восточном побережье оз. Ильмень распространены аллювиально–луговые почвы.

Волховско–Ильменская низменность к северу от оз. Ильмень сложена, главным образом, ленточными глинами, широко распространены подзолисто–глеевые и торфяно–глеевые почвы. В отдельных местах встречаются карбонатные отложения, находящиеся на значительной глубине и их роль в почвообразовании незначительна. К востоку от р. Волхов встречаются песчаные отложения с преобладанием сильно подзолистых почв.

Широко распространены супесчаные и песчаные отложения в Предвалдайской полосе, на них формируются, на которых формируются подзолистые и болотные почвы. Для Валдайской возвышенности характерен ландшафт конечных морен, который объясняет пестроту почвообразующих пород. Преимущественно она сложена валунными суглинками, где ложбины и впадины, занимающие пространство между грядами, заполнены болотами, заболоченными почвами и озёрами. В связи с этим почвенный покров весьма многообразен. Здесь могут встречаться дерновые, дерново–слабоподзолистые и сильноподзолистые почвы различного механического состава. В юго–восточной части встречаются карбонатные отложения, относящиеся к дерновым и дерново–подзолистым почвам. В южной – суглинистые и грубопесчаные отложения с преобладанием средне и сильноподзолистых почв.

Территорию Северо–Запада принято считать зоной достаточного и избыточного увлажнения, но влагозапасы в почво–грунтах также находятся в прямой зависимости от механического состава и уровня грунтовых вод.

Промерзание почвы

На территории Северо–Запада глубина промерзания на полевых (открытых) участках, как правило, начинается в октябре–ноябре и, достигает своего максимума в марте. Глубина промерзания изменяется: средняя от 30 – 60 см, наибольшая до 140 см (г. Боровичи 1953 –5 4 г.) и наименьшая в пределах 2 – 30 см. Однако в отдельные годы почва может оставаться слабо промерзшей и даже талой из–за мощного снежного покрова.

Как правило, оттаивание почвы происходит сверху и идет медленно до схода снежного покрова, а затем быстро под влиянием солнечных лучей. Оттаивание может происходить и снизу вверх под влиянием тепла, поступающего из нижних талых слоев. Обычно полное оттаивание на территории исследования наблюдается в конце апреля.

2.1.4 Растительность

Большая часть территории Северо–Запада расположена в зоне тайги. Лишь небольшая юго–западная часть находится в зоне смешанных лесов.

Хвойные еловые леса покрывают большую территорию Северо–Запада, также широко распространены заболоченные еловые леса, на дне долин встречаются травяные ельники с высоким и густым травяным покровом. Сосновые леса образуются на более легких песчаных и супесчаных почвах, а на песках – лишайниковые боры–беломошники с травяным покровом с преобладанием вереска и брусники. Зачастую лес приобретает характер смешанного елово–соснового с лиственными породами.

Лиственные леса представлены в основном мелколиственными породами (ольхой, березой, осиной). На юго–западе нередко встречаются широколиственные породы (дуб, липа, клён, вяз и ясень).

Наиболее залесенными районами являются бассейны р. Ояти и Сяси (до 85 % площади). Наименьшая лесистость отмечается в бассейнах р.Шелони, Великой и верхнем и нижнем течении р. Ловать (в пределах 30 – 40 %).

Около 30 % территории Северо–Запада занимают болота и заболоченные земли. Наиболее заболоченной является Приильменская низменность. Преимущественно болота верховые, а также низинного и переходного характера (осоковосфагновые, осоко–пушицевые, осоковые).

Семь процентов территории находится под лугами. Большая часть лугов суходольные со злаково–разнотравной растительностью. Долинам крупных рек свойственны пойменно–

заливные луга. Большинство расположено в долине р. Волхова и в низовьях рек, впадающих в оз. Ильмень.

2.1.5 Геология

Территория Северо–Запада расположена целиком в пределах Русской платформы и сложена в основном комплексом осадочных дочетвертичных отложений, залегающих под четвертичными на архейском или протерозойском кристаллическом основании. Осадочные коренные образования представлены в основном отложениями палеозоя: толщами нижнего кембрия, нижнего, среднего и верхнего ордовика, среднего и верхнего девона, нижнего и среднего карбона. На северо–западе территории, на склоне Балтийского щита, под четвертичными отложениями залегают рыхлые песчано–глинистые породы нижнего кембрия общей мощностью 200 – 500 м.

К югу располагается полоса ордовикских отложений, образующая Силурийское плато. Эти отложения представлены песчаниками, известняками и доломитами общей мощностью 100 – 150 м. Характерна трещиноватость пород, встречается карст. В основании глинта Силурийского плато и по долинам прорезающих его рек встречаются выходы кембрийских песчаников и синих глин.

К югу и востоку от Ордовикского плато находится обширная область развития преимущественно рыхлых девонских отложений, представленные средним и верхним отделами. Мощностью 50 – 150 м для среднего девона и верхнего – до 300 м.

С востока и юго–востока представлены полосой каменноугольных отложений (представлен нижним и средним отделами), слагающих Карбоновое плато. Нижний карбон сложен известняково–глинистой и известняково–доломитовой толщей мощностью 60 – 95 м. Средний карбон сложен известняками и доломитами. Мощность его неравномерная и изменяется от 12 до 80 м. Характерна трещиноватость пород, встречается карст.

Палеозойские осадочные породы перекрыты толщей четвертичных отложений, представленные ледниковыми или послеледниковыми образованиями, мощностью от 0,5 до 5 м на участках Силурийского плато, от 10 до 20 м в Приильменской и Предглинтовой низменностях и достигает до 200 м на возвышенностях.

Карст

В границах территории исследования карст встречается в двух основных районах: на Силурийском и Карбовом плато. В состав карстовых пород входят доломиты, известняки, гипсы, соленосно–карбонатные породы. Основная функция карста – аккумуляция подземных вод. Наиболее сильно карст развит на Ижорском плато. Оно покрыто маломощным пластом

морены (1 – 2 м) и характеризуется почти полным отсутствием гидрографической сети, так как карстовые воронки, суходолы сразу же поглощают дождевые и талые воды. Размеры карстовых воронок варьируются в поперечнике от 0,5 до 40 м, глубина от 0,5 до 8 м, иногда может достигать 15 м. На участках, где мощность четвертичных отложений увеличивается (до 6 – 8 м) формы карста практически отсутствуют.

Некоторое развитие карстовых форм встречается на территории псковской области в пределах распространения карбонатно–гипсовых отложений среднего девона.

Карстовые воронки чаще всего встречаются в долинах рек Тихвинка, Уверь, Воложба, вблизи г. Боровичи.

2.1.6 Гидрография

Реки данной территории входят в систему водотоков и водоемов Балтийского бассейнового округа согласно современному гидрографическому и водохозяйственному районированию территории Российской Федерации.

Территория покрыта густой сетью водотоков, множеством озер и обширными болотами. В среднем густота речной сети составляет 0,45 км / км² и изменяется по территории больших пределах. Например, густота речной сети на Ижорской возвышенности составляет 0,07 км / км², а в бассейне р. Пола колеблется от 0,84 до 0,96 км / км²,

Большинство рек рассматриваемой территории берут начало на водоразделе между Балтийским и Каспийским морями, находящийся на Валдайской возвышенности. Большую часть рек по своему типу являются равнинными. Наиболее значительными водотоками в пределах выбранной территории являются реки: Свирь, Волхов, Сясь, Тихвинка, Паша, Ижора и Тосна. Большинство водотоков — малые реки длиной менее 10 км, имеющие спокойное течение и незначительные уклоны (до 20 – 40 см / км). Однако, скорость течения может резко возрастать на перекатах и порогах при пересечении кристаллических пород, моренных возвышенностей и гряд. Характерной особенностью исследованных рек является их относительная слабая естественная зарегулированность озёрами [Гидрография СССР...,1964].

Наиболее значительными озерами являются Ладожское, Ильмень и Чудско–Псковский озёрный комплекс. Значительное большинство озер ледникового происхождения. Практически все они продолговатой формы, проточного типа. На востоке и юго–востоке территории встречаются карстовые озера. В бассейне р. Волхов встречаются озера болотного типа, незначительные по площади (не более 0,5 – 1 км²) с илистым дном, мощность которого может достигать 3,5 м. Как правило, береговая линия плохо выражена, рельеф дна плоский, глубины не превышают 10 м.

Избыточная влажность, плоский рельеф и неглубокое залегание грунтовых вод способствует распространению болот, болотные массивы которых могут занимать площадь более 1000 га (например, Зеленский Мох в бассейне р. Сясь имеет площадь около 60,2 тыс.га).

2.1.8 Гидрологический режим

Всё водотоки рассматриваемого района относятся к типу равнинных рек со смешанным питанием, но с преобладанием снегового. Все четыре фазы водного режима четко выражены и сменяют друг друга в течение года.

Значительную часть объема годового стока обычно составляет сток весеннего половодья. Дождевые паводки наблюдаются в летний и осенний периоды, в апреле-мае дождевые паводки могут накладываться на ветви подъема или спада половодья. Нередко отмечаются зимние паводки, обусловленные глубокими оттепелями при вторжении атлантических циклонов. Дважды в году, летом и зимой, отмечаются меженные периоды. На мелких водотоках с площадями водосборов менее 0,5 км² могут наблюдаться периоды полного пересыхания пересыхания (перемерзания) русла, а в маловодные годы это явление может наблюдаться и на реках с площадями до 50 км². Среднее многолетнее распределение весеннего (снегового), дождевого и подземного стока в году в процентах от среднего годового стока находится в соотношении 50:20:30. В отдельные годы это соотношение резко нарушается как в сторону увеличения доли снегового питания за счет уменьшения дождевого и подземного, так и в сторону сокращения доли снегового стока и увеличения доли двух других составляющих.

Весеннее половодье начинается в конце марта, начале апреля на южных и юго-западных районах. Наиболее раннее его начало отмечается в первой декаде марта, наиболее позднее – в конце апреля. Половодье заканчивается, как правило, в конце мая, а в отдельные годы сроки могут отличаться от средних многолетних. Средняя продолжительность весеннего половодья колеблется от 15 до 20 суток. Для рек района характерна одна волна половодья. Форма гидрографа – однопиковая. Однако в отдельные годы отмечаются двух пиковые весенние половодья в связи с возвратом холодов. Суммарный слой стока за период половодья изменяется от 120 до 150 мм. Он определяется в основном притоком талых вод. При этом доля дождевых вод составляет 2 – 5 %, а подземных вод 10 – 15 %.

Максимальные расходы отмечаются на пике весеннего половодья, который наблюдается в среднем в конце второй декады апреля.

Дождевые паводки на реках формируются ежегодно в теплый период года. Количество их в течение года колеблется от 1 – 2 до 3 – 4, а в отдельные годы до 5 – 6. При глубоких оттепелях паводки бывают и в зимний период. Наиболее дождливыми месяцами являются август–октябрь.

Согласно справочным данным, по максимальным расходам воды дождевые паводки примерно в 2 – 3 раза меньше весеннего половодья. Однако в последние годы максимальные расходы дождевых паводков превосходят максимальные расходы половодья.

Максимальные расходы воды зимних паводков составляют 20 – 40 % от максимальных расходов паводков теплого периода года.

Минимальные расходы воды наблюдаются дважды в году – в периоды летне–осенней и зимней межени, когда сток рек формируется преимущественно подземными водами.

Летне–осенняя межень обычно наступает в первой–второй декаде июня и продолжается 2 – 3 месяца. При дружном прохождении весеннего половодья межень начинается значительно раньше – в середине мая, а в годы с затяжным весенним половодьем, или когда на спаде его проходят дожди – в середине июля. Наиболее маловодный период летне–осенней межени отмечается в июле, августе, реже в сентябре. Его средняя продолжительность около двух недель. Зимняя межень обычно устанавливается в середине декабря. Наиболее ранние сроки ее начала приходятся на первую декаду ноября наиболее поздние – на январь. Ее средняя продолжительность около ста суток. В отдельные годы зимняя межень во время оттепелей прерывается паводками, поэтому средний расход воды за межень иногда в 1,5 – 2 раза больше минимального расхода. Наиболее маловодный период продолжается около двух недель, обычно наблюдается в феврале–марте.

2.1.9 Гидрологическая изученность территории исследования

Гидрологическая изученность территории характеризуется числом и продолжительностью действия гидрометрических станций и постов. Мониторинг гидрологического режима рек рассматриваемой территории проводится Северо–Западным УГМС (далее — опорная сеть станций и постов (рисунок 2.1)).

Сеть станций и постов развивалась главным образом в обжитых районах. Размещение сети гидрометрических станций и постов на рассматриваемой территории определено исторически сложившимися условиями, временем и степенью хозяйственного освоения отдельных районов.

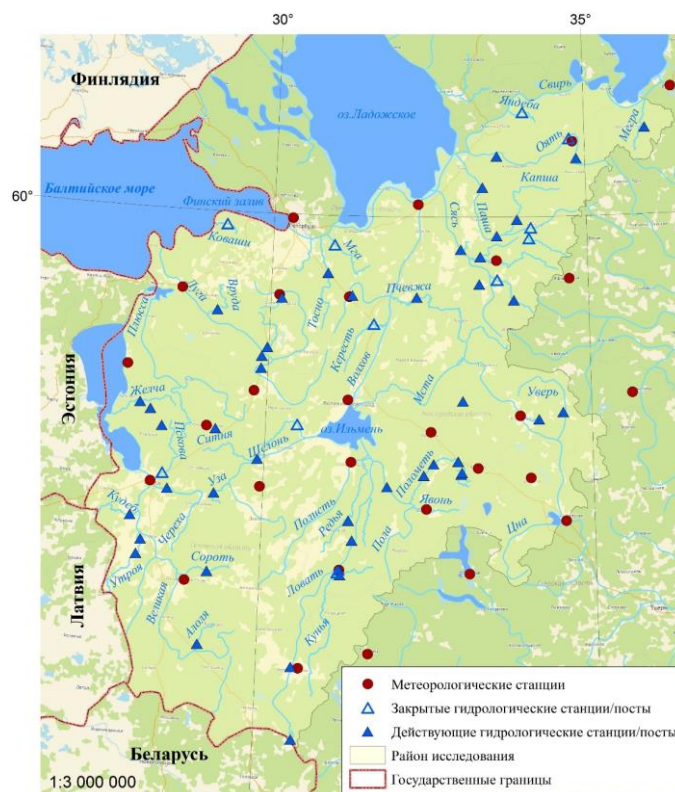


Рисунок 2.1 – Схема расположения гидрологических и метеорологических станций/постов, данные наблюдений, которые использовались в работе

2.2 Атмосферные осадки

Задачами настоящего раздела работы являются оценки надежности данных реанализов и локатора ДМРЛ-С на основе их сравнения с наземными наблюдениями, а также анализ многолетней динамики осадков, прежде всего, за теплый сезон.

Множество исследовательских групп по всему миру разрабатывают глобальную и региональную сеточную информационную продукцию об атмосферных осадках на основе комбинирования наземных данных (как правило, с метеостанций международного обмена), спутниковой и радиолокационной информации, а также модельных оценок [Arshad et al., 2021, Nicholson et al., 2003]. Широкое распространение получили реанализы, имеющие высокую продолжительность воспроизводимых рядов осадков и достаточное для региональных обобщений пространственное и временное разрешение [Mahmoud et al., 2019, Hassler, Lauer, 2021]. Помимо реанализов, метеорологические локаторы с высоким пространственно-временным разрешением и увеличением объема накопленных данных стали применяются в различных гидрологических областях.

Однако, измерения, проводящиеся на станциях и постах, с использованием осадкомеров и пьювиографов различных типов, остаются наиболее надежными источниками информации и

могут быть использованы в качестве независимых источников данных для оценки точности характеристик атмосферных осадков, полученных из сеточных продуктов.

2.2.1 Оценка точности данных реанализа

Исследования, посвященные оценке точности данных реанализа в основном направлены на оценку годовых, сезонных и месячных величин. В работах [Condrón et al., 2006, Zappa et al., 2014] отмечается, что глобальные реанализы хорошо согласуются с данными наземных наблюдений, но дают смещенные оценки в сторону занижения.

Однако реанализы постоянно совершенствуются за счет более точных рядов данных и появления новых методик расчетов, исправляются ошибки более ранних версий, повышается пространственное и временное разрешения. В настоящей работе для оценки был выбран глобальный реанализ ERA5 [Copernicus, 2017] - новейший реанализ климата, подготовленный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), предоставляющий ежечасные данные по многим параметрам состояния атмосферы, поверхности суши и моря вместе с оценками неопределенности. Данные ERA5 доступны с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$, с параметрами атмосферы на 37 уровнях давления. ERA5 продолжает расширяться во времени, при этом ежедневные обновления доступны на 5 дней позже реального времени.

В качестве наземных данных использовались данные наблюдательной сети Росгидромета (26 станций и постов) и Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ» (Дворец, Яжелбицы, Ермошкино, Лычково, лог Таёжный). Не все перечисленные пункты наблюдений входят в список станций Всемирной Метеорологической Организации (ВМО), и представляют из себя независимый материал для анализа. Стоит также отметить, что данные пункты наблюдений в совокупности создают довольно плотную сеть для целей всесторонней оценки точности данных реанализа.

Для каждой станции проводилось сопоставление сезонной (май–октябрь) и суточной суммы осадков (в мм) по результатам измерений и данным реанализа ERA5 за теплый период года (май–октябрь) за совместный период с 1979 по 2019 гг. Отдельно рассматривалась характеристика максимальной в году суточной суммы осадков за теплый период.

Для количественной оценки для каждой из трех характеристик были посчитаны коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратическое отклонение ($RMSE$).

Анализ коэффициента детерминации показал, что наилучшая связь между двумя массивами прослеживается при сравнении сезонных сумм осадков (рисунок 2.2) что согласуется с результатами предыдущих исследований.

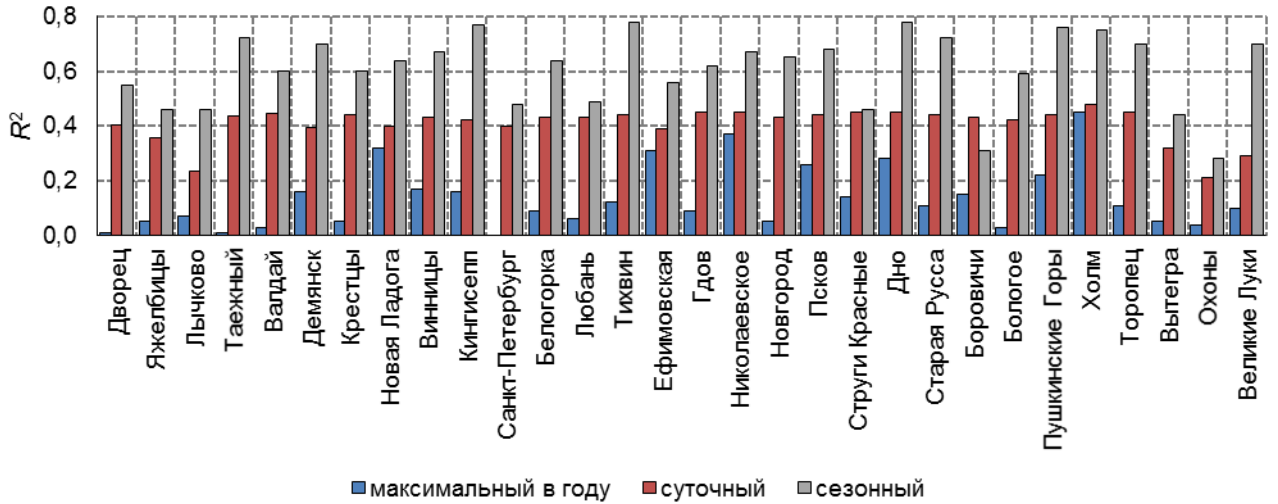


Рисунок 2.2 – Коэффициент детерминации максимальных в году, суточных и сезонных сумм осадков по данным наземных наблюдений и реанализа ERA5 – за период 1979 – 2019гг.

Намного хуже данные реанализа улавливают суточный ход осадков (коэффициент детерминации составляет от 0,21 до 0,48). Вероятно, это связано как с материалом, на основе которого создавался глобальный реанализ (редкая сеть наземных наблюдений для территории РФ, которая не способна улавливать особенности характерные для данной местности), так и с физико–географическими особенностями характерные для данной местности, такие как влияние возвышенности. Связь максимального суточного слоя в году практически отсутствует, в основном не превышает 0,2, исключением является станция Холм ($R^2 = 0,48$).

Несмотря на хорошую связь, полученные по данным реанализа сезонные суммы осадков показывают завышенные оценки по отношению с наблюдаемыми на 5 – 15 % (рисунок 2.3), а для 21 пункта (70 % от общего числа) не повторяют общую динамику многолетних изменений (рисунок 2.4).

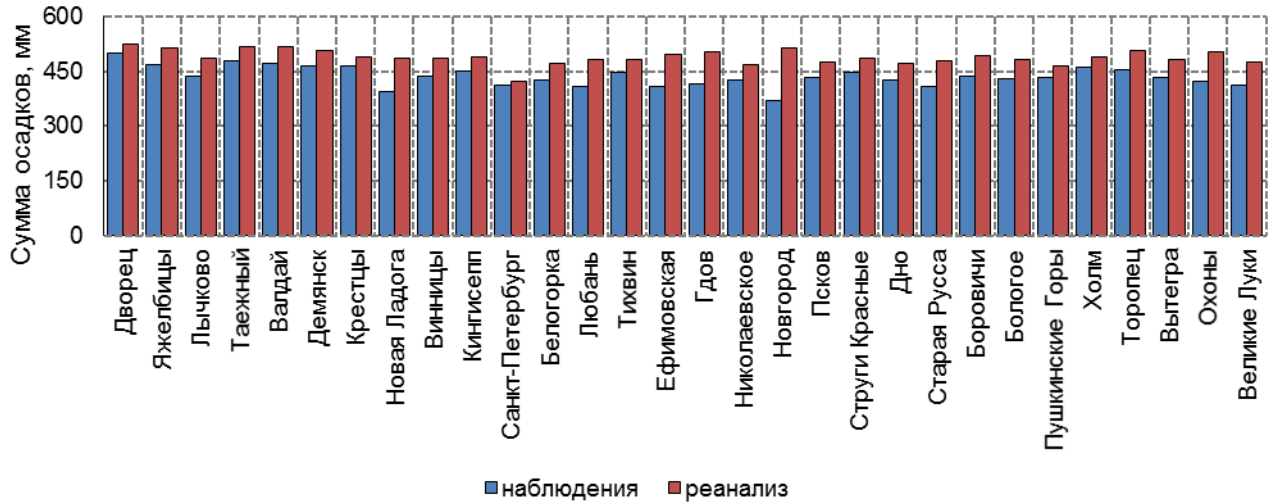


Рисунок 2.3 – Сезонная сумма осадков (мм) по данным наземных наблюдений и реанализа ERA5 – за период 1979 – 2019 гг.

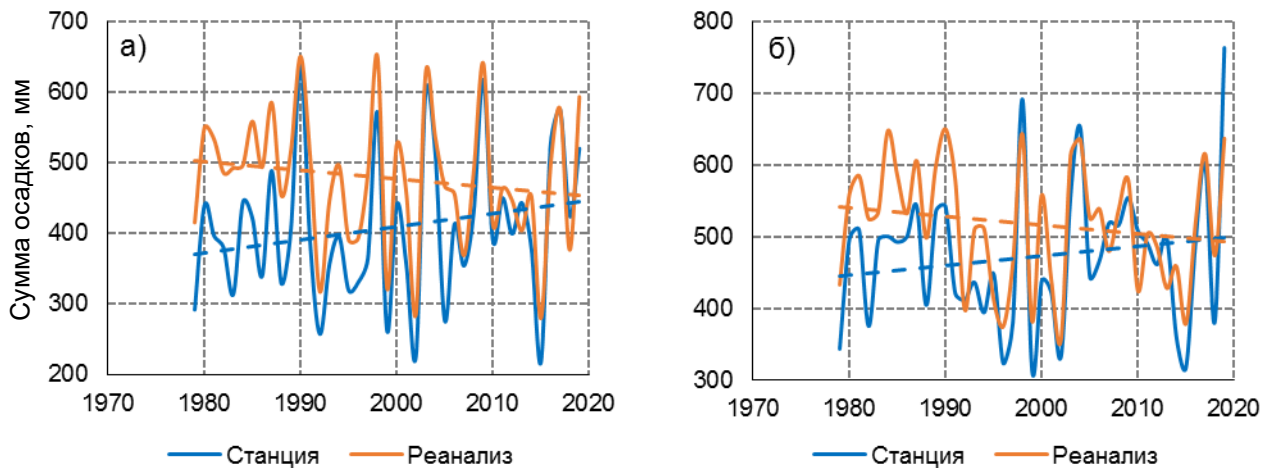


Рисунок 2.4 – Многолетние сезонные суммы осадков (мм) по данным наземных наблюдений и реанализа ERA5 – за период 1979 – 2019 гг. для постов: а) Старая Русса и б) Валдай

Анализ величин среднеквадратического отклонения позволил отобразить соответствие реанализа ERA5 наземным данным. Самые высокие значения отклонений по трем характеристикам получены для поста Лычково (рисунок 2.5), что, вероятно, связано с наличием наибольшего количества пропусков в данных (более 30 %).

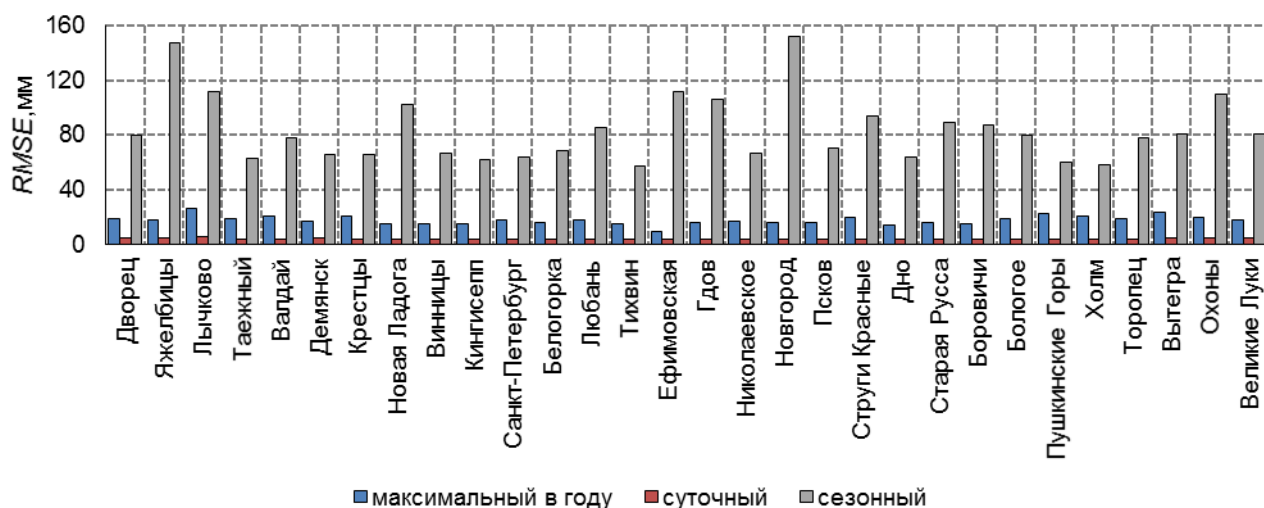


Рисунок 2.5 – Величины среднеквадратического отклонения ($RMSE$) максимальной в году, суточной и сезонной суммы осадков, мм

Анализ расхождений данных с мая по октябрь за многолетний период выявил, что в 32 % случаев реанализ показывает наличие осадков, в то время как фактические наблюдения их не зафиксировали и лишь в 1,5 % случаев осадки отмечены на метеорологических станциях, но не отображены в реанализе. Данные расхождения могут быть одной из причин выявленного завышения сезонных сумм осадков.

Так как реанализ ERA5 имеет часовое разрешение, то были построены зависимости слоя и интенсивности от продолжительности осадков (кривые редукции) за каждый год с 1979 по 2019 г. и проведено сопоставление с теми же зависимостями, полученными на основе плювиографических данных за совместный период наблюдений для метеорологической станции Валдай (рисунок 2.6). Расчет кривых редукций по данным реанализа был произведен согласно методике [Методические рекомендации., 1962], только для каждого года определялись наибольшие суммы осадков за интервалы времени кратные временному разрешению реанализа: 60, 120, 180, 300, 720, 1440 мин.

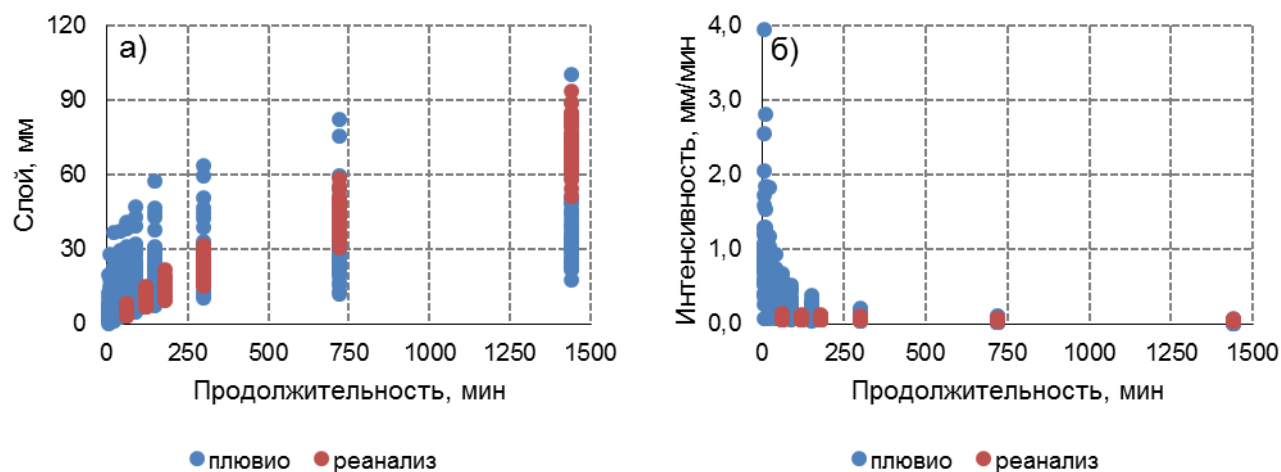


Рисунок 2.6 – Кривые редукции за период с 1979 по 2019 г., полученные по данным плювиографа и реанализа метеостанции Валдай

Полученные по реанализу кривые редукции характеризуются меньшей дисперсией по сравнению с кривыми по плювиографу (рисунок 2.6). Таким образом, можно отметить, что реанализ ERA5 недостаточно хорошо описывает структуру выпадения осадков на рассматриваемой территории. Принято считать, что интенсивность осадков увеличивается при уменьшении продолжительности дождя, что наблюдается по данным плювиографов, но не наблюдается по данным реанализа ERA5. При этом в некоторых работах отмечается, что реанализ ERA5 все же может хорошо улавливать данные по интенсивности осадков, особенно по сравнению с другими реанализами – CFS–2, MERRA–2, JRA–55 [Arshad et al., 2021].

В более ранних работах, посвященных применению данных реанализа и его сравнению с наземными наблюдениями, было показано, что реанализ может существенно искажать как интенсивность осадков, так и их повторяемость [Анисимов и др., 2015; Яровая, Посощков, 2017]. При этом в зависимости масштабов (локальный, региональный, глобальный) данные реанализа могут как завышать, так и занижать значения осадкомеров. Исходя из полученных нами результатов, интенсивность осадков у реанализа почти всегда постоянная, что видно по зависимостям на рисунках 2.6 – 2.7. В то же время в ряде работ было показано, что при определенных значениях суммы осадков (обычно > 10 мм) реанализ ERA5 обычно показывает хорошую согласованность с данными осадкомеров [Arshad et al., 2021].

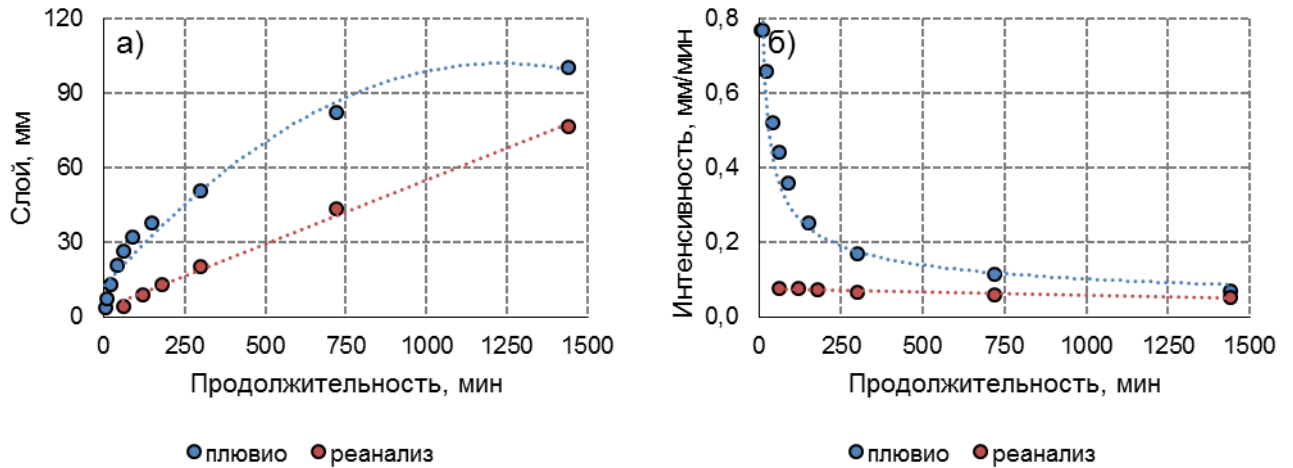


Рисунок 2.7 – Кривые редукции, полученные по данным pluвиографов и реанализа за 2019 г.

Основываясь на результатах сравнения, можно прийти к выводу, что данные реанализа недостаточно хорошо воспроизводят наблюдаемые на pluвиографах данные, особенно в случае часового хода осадков даже при максимальных суточных значениях суммы осадков (пример — рисунок 2.8). Это существенно ограничивает применимость реанализов для моделирования дождевых паводков.

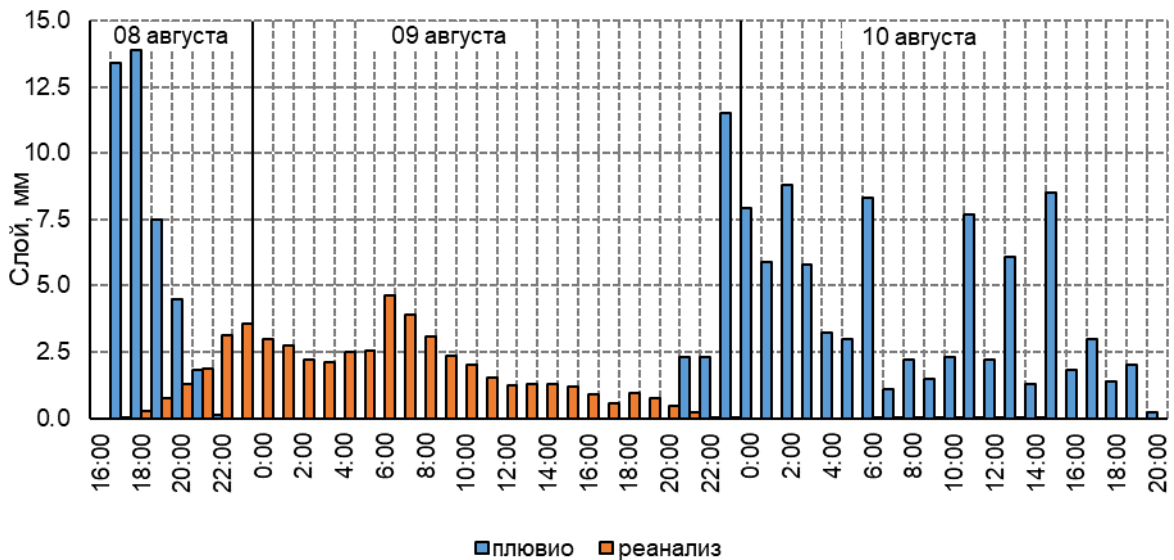


Рисунок 2.8 – Часовой ход осадков по данным pluвиографа и реанализа с 8 августа по 10 августа 2019 г.

Несмотря на описанные для некоторых пунктов случаи неудовлетворительного воспроизведения реальных данных реанализом, все же очевидно, что для целей гидрологического моделирования (особенно в случае ограниченности данных наземных

наблюдений) набор данных ERA5 является приоритетным по сравнению с реанализом ERA-Interim, занимая второе место после наблюдений [Tarek et al., 2020]. В то же время, полученные результаты указывают на то, что способность в воспроизведении осадков в реанализе ERA5 все еще нуждается в дальнейшем совершенствовании.

В предыдущих исследованиях также упоминалось, что качество и временной диапазон ассимилированных в реанализе данных с осадкомеров также существенно влияют на репрезентативности калиброванного результатов реанализа [Sharma et al., 2020]. Существенные улучшения в репрезентативности данных реанализа в случае их калибровки данными с плотной сети осадкомеров [Nicholson et al., 2003]. Кроме того, плотная калибровочная сеть более репрезентативна для обеспечения фактического распределения осадков, а также лучше способна улавливать орографический эффект, чем разреженная калибровочная сеть, что повышает точность результатов реанализа [Blacutt et al., 2015].

Различия в данных реанализа по сравнению с данными наземных наблюдений могут быть вызваны различиями в схемах ассимиляции данных, а также различиями в общей базе модели реанализа [Jones et al., 2021]. Однако определить, какой фактор оказывает наибольшее влияние на расхождение данных, на практике очень сложно. Для реанализа ERA5 все еще описываются случаи смещений (biases), такие как смещение значений влажности (wet bias) над Центральной Африкой и Индийским океаном и смещение засух (dry bias) над континентальными районами Северного полушария. Однако количество таких случаев явно уменьшилось по сравнению с реанализом ERA Interim [Hassler, Lauer, 2021]. Кроме того, гистограммы распределения частот, временные ряды аномалий и анализ годового цикла для конкретных регионов показывают общее улучшение репрезентативности результатов реанализа ERA5 по сравнению с ERA-Interim.

2.2.2 Оценка точности данных метеорологического лоатора

В работе использовались радиолокационные данные, полученные с помощью доплеровского метеорологического радиолокатора (ДМРЛ-С) в г. Валдай, предназначенного для обеспечения метеорологической информацией об осадках, облачности и других явлениях погоды. Радиолокационный метод измерения осадков имеет ряд преимуществ перед наземным методом: высокое пространственное разрешение и оперативность получения данных. Однако он не является прямым способом получения осадков, что затрудняет оценку точности измерения осадков таким методом. Радиолокационная оценка осадков производится путем измерения отражаемости Z на уровне 600 м. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что величина Z связана с интенсивностью атмосферных осадков I эмпирическим соотношением:

$$Z = AR^b, \quad (2.1)$$

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, результаты исследований, проведенные для проверки ZR -отношения, показали, что параметры A и b изменяются в широком диапазоне и зависят от многочисленных факторов, в первую очередь, от типа осадков и особенностей синоптических процессов в районе наблюдений. Для данной территории уже производился подбор параметров для различных типов дождей: работа Сальмана [Сальман, 1957] рассматривала обложные и ливневые дожди Ленинградской области. В работе Боровикова и др. [Боровиков и др., 1967] исследовались все типы дождей в районе города Валдай. В первой работе были получены коэффициенты $A = 220$, $b = 1,54$; во второй – $A = 230$, $b = 1,5$.

В данном исследовании проводилось уточнение параметров ZR -отношения для тёплого периода года, включающий месяцы с мая по октябрь без разделения по типам дождей. Тёплый период был выбран для того, чтобы сфокусироваться на жидких осадках. Расчет количества осадков за выбранный интервал времени производится на основе радиолокационной метеорологической отражаемости Z с 10 минутным временным разрешением. Отражаемость переводилась в интенсивность осадков по формуле (2.1). Затем, для каждого радиолокационного пикселя, количество осадков рассчитывается путем накопления значений интенсивности осадков до нужного интервала времени (сутки, час). Далее суммы осадков по локатору сравнивались со слоями, полученные на метеостанциях. В результате был произведен не только подбор коэффициентов A и b по наилучшему соответствию слоям, полученным по ДМРЛ-С и метеостанциям, но и сравнение результатов по стандартным уравнениям:

- Стандартное отношение, выведенное Маршаллом и Палмером, $A = 200$, $b = 1,6$ и предложенное для использования во Временных указаниях;
- Уравнение Берюлева, выведенное в 1966–х гг. для Валдайской станции по материалам двухлетних наблюдений, $A = 340$, $b = 1,5$;
- Уравнение Боровикова, выведенное в 1960–х гг. для Валдайской станции, $A = 230$, $b = 1,5$;
- Уравнение Литвинова, выведенное для Европейской территории СССР, $A = 275$, $b = 1,4$.

Выводы о качестве подбора параметров делались на основании значений коэффициентов детерминации (R^2), среднеквадратического отклонения ($RMSE$) рассчитанных по локатору и метеостанциям.

Анализ данных радиолокационных и наземных измерений проводился для суточных сумм осадков за 2014 – 2018 и 2020 года (данные за 2019 год отсутствуют из-за поломки локатора), полученным по ДМРЛ-С «Валдай» и метеостанциям, расположенным в зоне действия локатора в радиусе 100 км (таблица 2.5, рисунок 2.9).

Таблица 2.5– Метеорологические посты, попадающие в зону действия ДМРЛ-С «Валдай»

Номер	Станция	Широта, °	Долгота, °	Высота, м	Удаленность от ДМРЛ-С, км
262850	Крестцы	58,267	32,533	63	56,01
262910	Боровичи	58,417	33,9	89	63,42
262980	Бологое	57,9	34,03	188	45,12
263810	Демянск	57,65	32,467	62	58,72
263890	Осташков	57,133	33,117	218	91,81
263930	Вышний Волочек	57,55	34,567	169	89,06

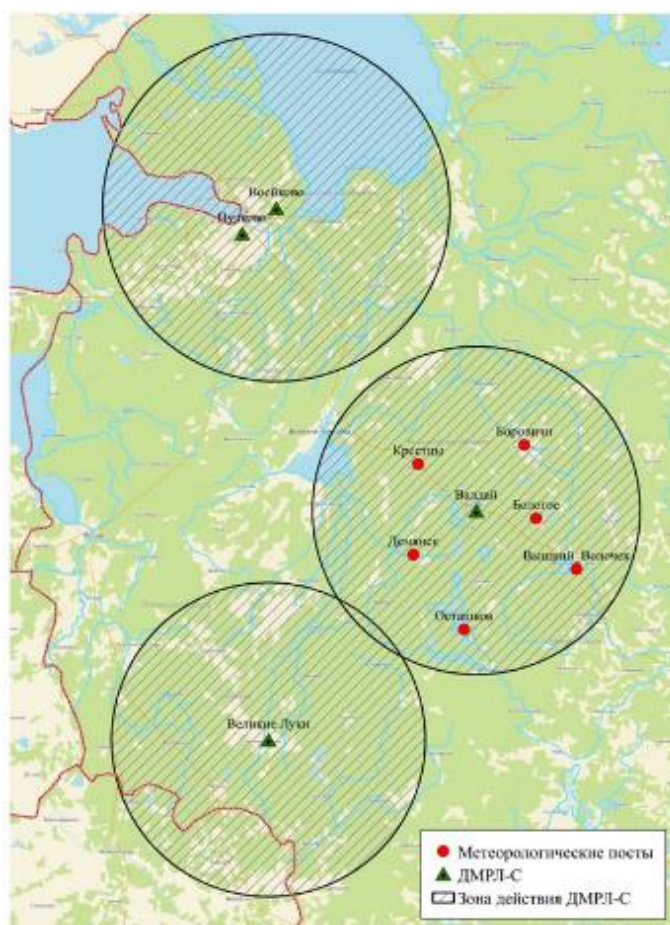
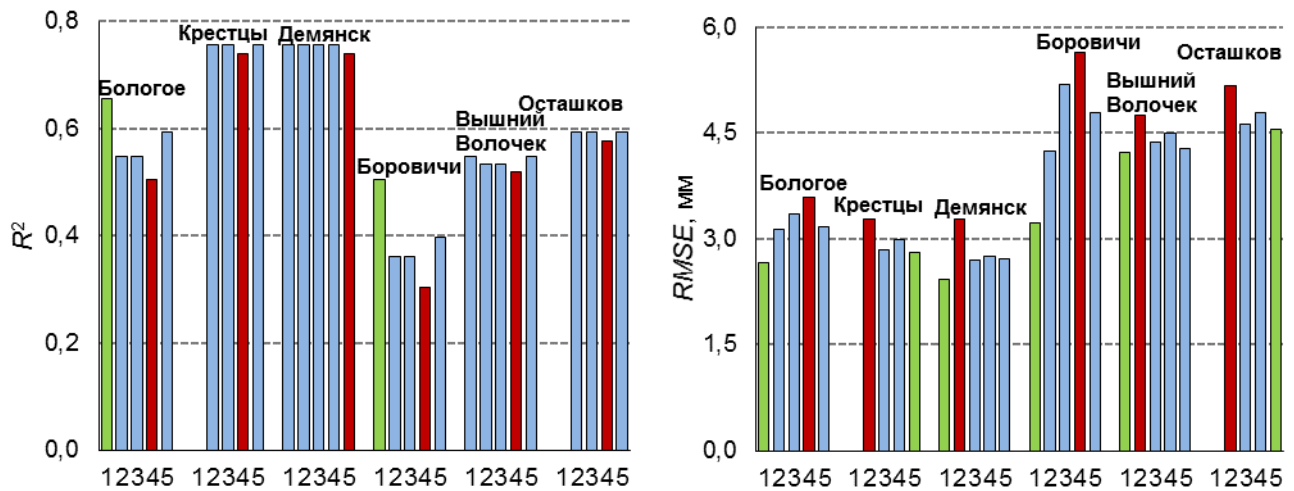


Рисунок 2.9 – Карта-схема района исследования с расположением ДМРЛ-С и используемых для калибровки метеостанций

На рисунке 2.10 представлены результаты калибровки для 2015 года по 5 комбинациям параметров A и b для 6 метеостанций.



1. Эмпирически подобранное ZR -отношение;

2. Уравнение Берюлева, выведенное в 1966-х гг. для Валдайской станции, $A = 340$, $b = 1,5$;

3. Уравнение Боровикова, выведенное в 1960-х гг. для Валдайской станции, $A = 230$, $b = 1,5$;

4. Уравнение Литвинова, выведенное для Европейской территории СССР, $A = 275$, $b = 1,4$;

5. Стандартное отношение Маршалла и Палмера, $A = 200$, $b = 1,6$, предложенное для использования во Временных методических указаниях по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике.

Рисунок 2.10 – Значения коэффициента R^2 и $RMSE$ между слоями осадков, рассчитанных по локатору и метеостанциям для каждого стандартного уравнения

На рисунке 2.10 метеостанции расположены по мере удаления от локатора. С увеличением расстояния между метеостанцией и локатором наблюдается падение значения коэффициентов детерминации и увеличение значений $RMSE$. Для метеостанций Боровичи, Вышний Волочек и Осташков это может быть связано также с рельефом местности, т.к. юго-восточная часть является наиболее возвышенной.

Анализ расхождений суточных осадков за теплый период выявил, что в 15 – 20 % случаев локатор показывает наличие осадков, в то время как фактические наблюдения их не зафиксировали (ложные осадки) и лишь 0,5 – 3,0 % составляют случаи пропуска осадков, когда ДМРЛ-С не зафиксировал осадки над осадкомерами.

В результате подбора почти во всех случаях эмпирически подобранные параметры A и b дают наибольшие значения R^2 и наименьшие значения $RMSE$ (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Результаты калибровки локатора за 2014 – 18, 2020 гг.

Год	Параметры/ Метеостанция	Бологое	Крестцы	Демянск	Боровичи	Вышний Волочек	Осташков
2014	$A = ; b =$	190; 1,95	190; 2,2	190; 1,7	190; 2,05	190; 1,8	–
	R^2	0,66	0,49	0,55	0,52	0,56	–
	$RMSE$	3,79	4,90	4,30	4,65	4,69	–
2015	$A = ; b =$	190; 2,05	190; 1,6	190; 1,6	190; 2,05	160; 1,9	200; 1,6
	R^2	0,77	0,80	0,80	0,58	0,74	0,77
	$RMSE$	3,15	3,68	3,74	4,66	4,22	4,55
2016	$A = ; b =$	190; 2	200; 1,8	190; 2,05	190; 2,05	–	–
	R^2	0,42	0,68	0,60	0,51	–	–
	$RMSE$	9,90	4,90	5,36	5,40	–	–
2017	$A = ; b =$	190; 1,8	190; 2,05	190; 1,6	180; 1,4	200; 2,05	200; 2,05
	R^2	0,53	0,26	0,56	0,49	0,39	0,51
	$RMSE$	5,79	7,33	7,61	8,73	5,96	5,30
2018	$A = ; b =$	275; 1,4	–	200; 2,5	160; 2,3	–	–
	R^2	0,43	–	0,35	0,37	–	–
	$RMSE$	5,98	–	4,87	5,43	–	–
2019	–	–	–	–	–	–	–
2020	$A = ; b =$	200; 1,9	170; 1,7	190; 2,0	200; 2,2	–	–
	R^2	0,70	0,60	0,42	0,58	–	–
	$RMSE$	3,02	3,30	2,78	2,73	–	–

Низкое значение коэффициента R^2 и высокие значения $RMSE$ в 2016 г., связано с прохождением обильных осадков 19.07, которые не были зафиксированы, вероятно, по причине отключения или настройки локатора с 28.06 по 18.07. Для примера, на метеостанции Бологое суточный стой осадков составил 79,4 мм, в то время как локатор зафиксировал только 0,4 мм.

За 2017 и 2018 гг. значения коэффициентов значительно отличаются от предыдущих лет. Это можно объяснить различным расширением исходных радиолокационных данных: 2014 – 16, 2020 гг. пространственное разрешение составляло 1 x 1 км, а в 2017 – 2018 гг. было 2 x 2 км.

При сравнении сезонных сумм осадков, полученные радиолокационным методом суммы имеют заниженные значения на 10 – 15 % по сравнению с наземным и разница возрастает по мере удаления от локатора (рисунок 2.11).

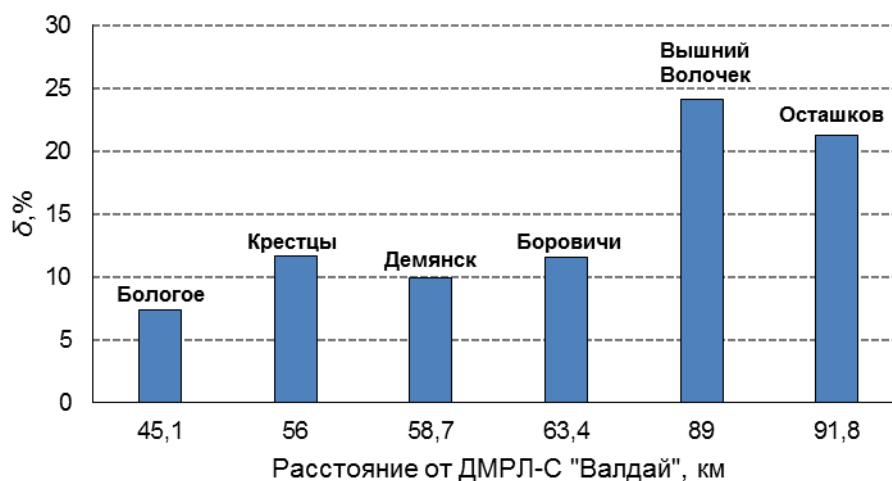


Рисунок 2.11 – Значение относительной ошибки сезонных сумм осадков за период с 2014 – 18, 2020 гг.

Оценка часовых сумм осадков проводилась за 2020 – 2021 гг. также для теплого периода года. В качестве наземных использовались данные pluвиографа, установленного в ноябре 2019 г. вблизи гидрологического поста р. Полометь – с. Яжелбицы на расстоянии около 20 км от ДМРЛ-С «Валдай». Как и в случае с суточными эмпирически подобранные параметры A и b для часовых сумм осадков дают лучшие значения коэффициентов R^2 и $RMSE$. Значения коэффициента детерминации составили 0,58 и 0,71, соответственно для 2020 и 2021 гг. Значения относительной ошибки сезонных сумм осадков, рассчитанные на основе часовых радиолокационных данных, не превышают 14 %, но, как и для суточных сумм также имеют заниженные оценки. Случаи ложных осадков не превышают 5 %, и не более 4 % составляют случаи пропуска локатором осадков, зафиксированные pluвиографом.

Стоит отметить, что при оценке точности данных локатора большое влияние на результаты оказывает значения параметров в ZR -отношении. Кроме того, сопоставляются значения измерений в точке (наблюдения на метеостанции с помощью осадкомеров, pluвиографов), со значениями на площади (ячейки радиолокационных измерений с расширением 1 x 1 км или 2 x 2 км) и на высоте около 600 м, что также вносит в результаты сравнения некоторую ошибку.

2.2.3 Современные изменения

Наземные измерения за атмосферными явлениями остаются самым достоверным источником об количестве осадков, а ряды наблюдений обладают достаточной продолжительностью для надежного анализа многолетних изменений.

Оценка изменений проводилась с помощью данных об атмосферных осадках 26 станций и постов сети Росгидромет за период с 1966 по 2019 гг. В качестве источника данных использовались архивы ФГБУ «ГГИ», ФГБУ «ВНИИГМИ–МЦД» и ФГБУ «Северо–Западного УГМС».

По результатам оценки выявлено, что значимых трендов в рядах суточных максимумов на большей части территории не наблюдается (рисунок 2.12а). Что касается суммы осадков за теплый период, в целом, на территории исследования преобладает тенденция к росту. В среднем скорость роста составляет 10 мм / 10 лет (рисунок 2.12б). В обоих случаях выделяется территория Валдайской возвышенности как область, где линейные тренды являются статистически значимыми.

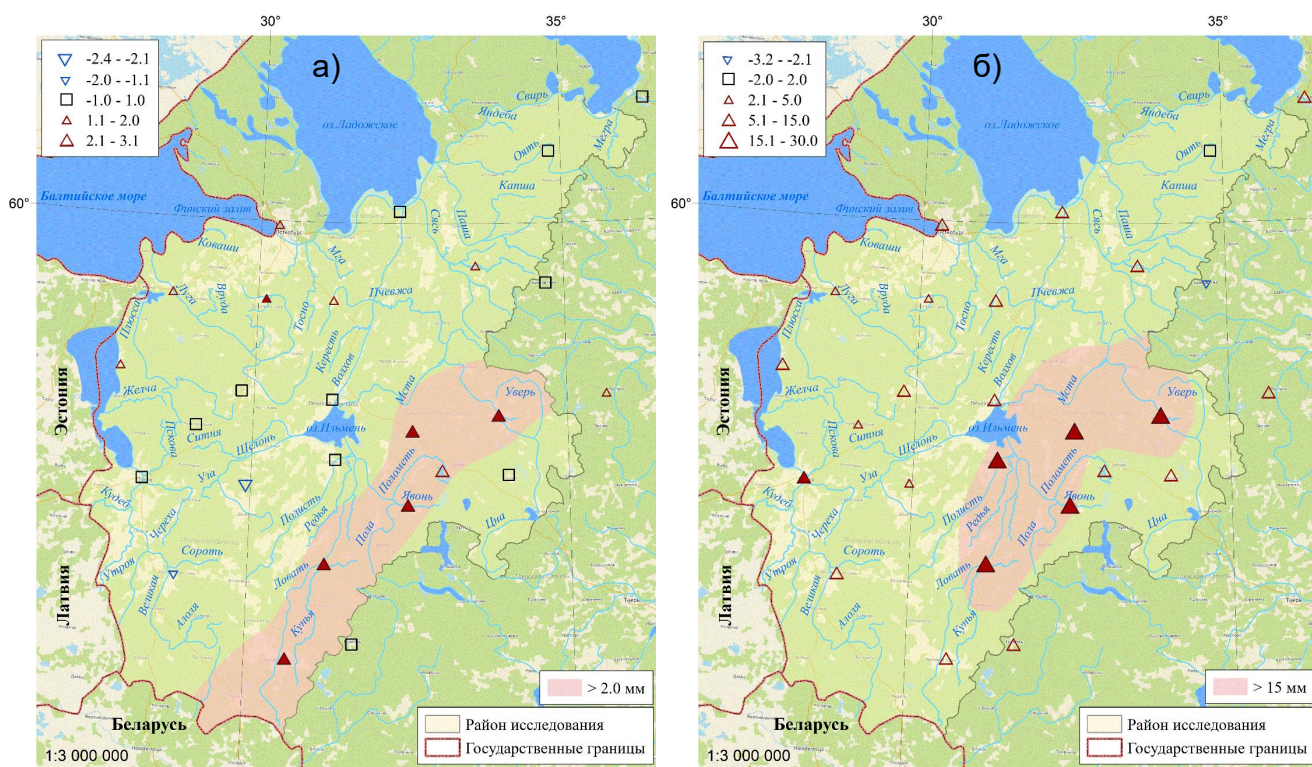


Рисунок 2.12 – Линейные тренды а) суточного максимума и б) суммы осадков за теплый период (май–октябрь) за 1966 – 2019 гг, мм / 10 лет. Заливкой выделены станции со значимым трендом ($\alpha = 0,05$)

Дополнительно были рассмотрены суммы осадков за теплый период отдельно по месяцам.

Суммы осадков в июне и августе характеризуются восходящими трендами, которые в среднем составляют 3,4 мм и 5,2 мм / 10 лет (рисунок 2.13), соответственно, для сентября наблюдается обратная ситуация (рисунок 2.14) с отрицательным трендом.

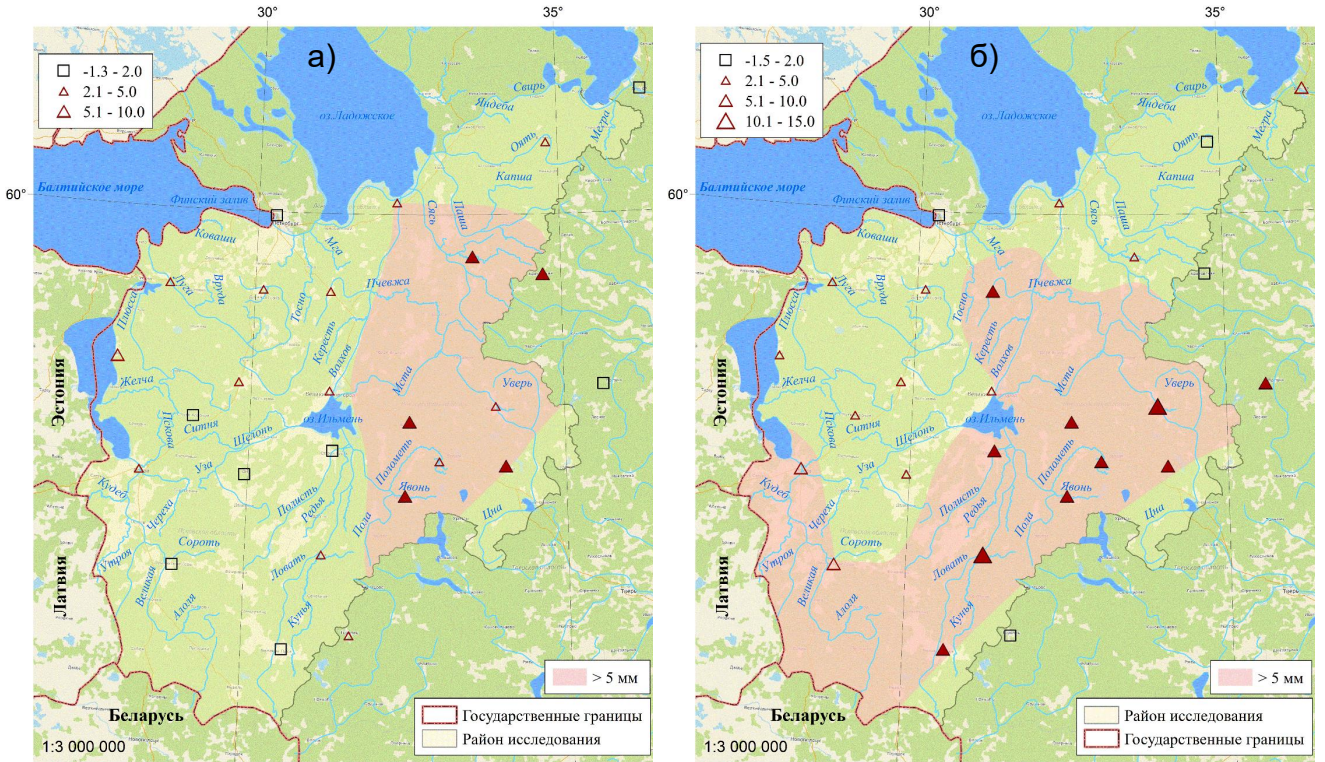


Рисунок 2.13 – Линейные тренды количества осадков за а) июнь и б) август за 1966 – 2019 гг, мм / 10 лет. Заливкой выделены станции со значимым трендом ($\alpha = 0,05$)

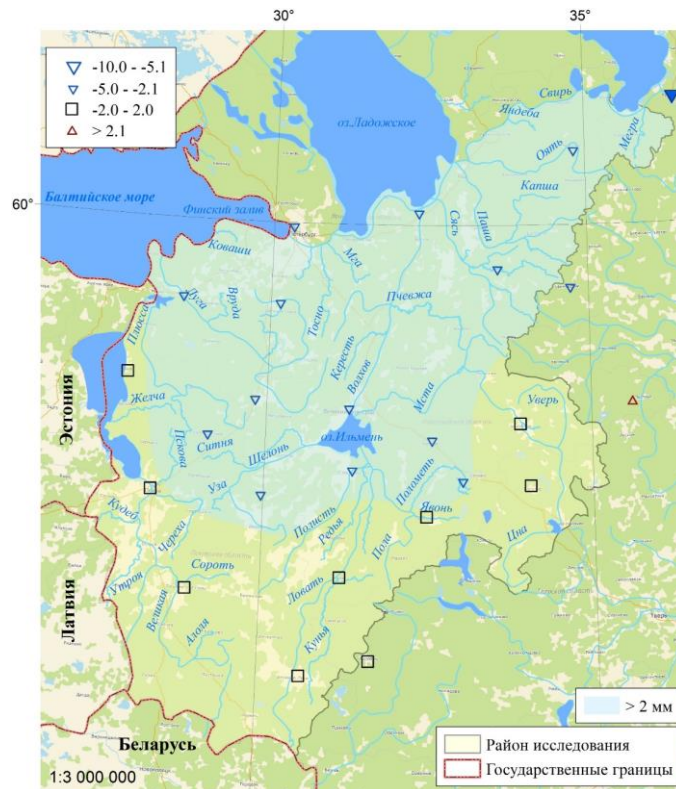


Рисунок 2.14 – Линейные тренды количества осадков за сентябрь за 1966 – 2019 гг, мм / 10 лет. Заливкой выделены станции со значимым трендом ($\alpha = 0,05$)

Изменения сумм осадков по остальным месяцам находятся в пределах естественной изменчивости.

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. по данным 5 постов. При анализе использованы случаи выпадения дождей с суммой более 10 мм.

Обработка данных плувиографических наблюдений выполнялась согласно [Методические рекомендации..., 1962]. Для каждого года обрабатывались записи всех случаев выпадения дождей, наблюдавшихся на метеорологическом посту, затем по ним определялись наибольшие слои осадков за интервалы времени 5, 10, 20, 40, 60, 90, 150, 300, 720, 1440 (некалендарные сутки) мин. В результате были получены многолетние ряды сумм осадков за соответствующие интервалы времени, по которым были рассчитаны линейные тренды. Ввиду низкой плотности сети плувиографов в пределах рассматриваемой территории – всего 5 действующих приборов на территории исследования, (большинство плувиографов прекратило работу в середине 90-х годов) и больших пропусков в многолетних рядах сумм осадков за короткие интервалы времени, какое-либо обобщение по данным плувиографов или районирование по территории не проводилось.

На рисунке 2.15 показаны значения линейных трендов слоя осадков за интервалы времени 5, 10, 20, 40, 60, 90, 150, 300, 720, 1440 (некалендарные сутки) мин и за календарные сутки, полученные по данным осадкомеров на постах Валдай, Санкт-Петербург, Новая Ладога. Полученные результаты в целом характеризуют наличие неоднородности в происходящих изменениях внутри рассматриваемых интервалов времени на данных метеостанциях. Так, на интервале продолжительностью менее 90 минут наблюдаются как отрицательные, так и положительные тренды. Одновременное увеличение коэффициента линейного тренда на всех постах наблюдается на временном интервале от 150 до 720 мин и уменьшение его значения на интервале 1440 мин. На двух постах Валдай и Новая Ладога положительные тренды наблюдаются для всех периодов времени, а на метеорологическом посту Новая Ладога статистически значимое увеличение наблюдается на всех интервалах, кроме 1440 мин.



Рисунок 2.15 – Значения линейных трендов слоя осадков за короткие интервалы времени на метеорологических постах: а) Валдай, б) Санкт–Петербург и в) Новая Ладога, мм / 10лет.

Красной заливкой выделены значения со значимым трендом ($\alpha = 0,05$)

На территории исследования в целом наблюдается тенденция к росту атмосферных осадков, а наиболее значительные изменения наблюдаются в районе Валдайской возвышенности (более 15 мм / 10 лет для сумм осадков за теплый период), где отмечаются положительные значимые ($\alpha = 0,05$), тренды.

2.3 Дождевой сток

Как и метеорологические, реанализы речного стока показали себя надежным источником данных для оценки годовых [Айзель и др., 2020] или месячных характеристик [Ayzel et al., 2020]. Однако, учитывая их временное разрешение до суток, данные таких реанализов могут быть использованы и для исследований характеристик максимального стока.

2.3.1 Оценка точности данных реанализов стока

Оценка возможности использования реанализа для определения характеристик максимального дождевого стока была выполнена на основе данных глобального GloFAS–ERA5 [River discharge and related historical data...] и регионального R5 [Regional Revised River Runoff Reanalysis (R5)] реанализов стока для пяти водосборов в бассейне р. Полонь (таблица 2.7). Наблюдения на данных водосборах проводятся на базе Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ» и представляют из себя независимый материал для оценки сеточных продуктов, так как не были использованы при создании выбранных реанализов стока.

Таблица 2.7 – Основные характеристики водосборов бассейна р. Полометь

Река – Пункт	Площадь водосбора, км ²
р.Лонница – д.Мосолино	48,3
р.Полометь – д.Дворец	432
р.Полометь – д.Яжелбицы	631
р.Полометь – д.Ермошкино	1180
р.Полометь – д.Лычково	2180

Реанализ речного стока GloFAS-ERA5 представляет собой глобальный набор данных с горизонтальным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ и суточным временным шагом, в основе которого лежат гидрологическая модель LISFLOOD и данные реанализа атмосферы ERA5. Реанализ стока R5 получен на основе концептуальной модели формирования речного стока GR4J и метеорологического реанализа WFDEI. Он охватывает только территорию Европейской части России и обладает горизонтальным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Для каждого гидрологического поста проводилось сопоставление с наблюдаемым максимального в году среднесуточного расхода воды дождевого паводка ($\text{м}^3/\text{с}$) по данным реанализов стока R5 и GloFAS-ERA5 за период с 1980 по 2016 гг.

Для количественной оценки были рассчитаны коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратическое отклонение ($RMSE$), а также определены основные параметры максимального среднесуточного расхода воды по трём источникам данных.

Анализ значений коэффициента R^2 показал, что данные регионального реанализа стока лучше согласуются с наблюдаемыми ($R^2 > 0,4$) (рисунок 2.16а), нежели данные глобального реанализа, исключение составляет гидрологический пост р. Лонница – д. Мосолино ($R^2 > 0,13$). Что касается $RMSE$, то величина его возрастает с увеличением площади водосбора (рисунок 2.16б), а разница в значениях, рассчитанных по двум реанализам, незначительна.

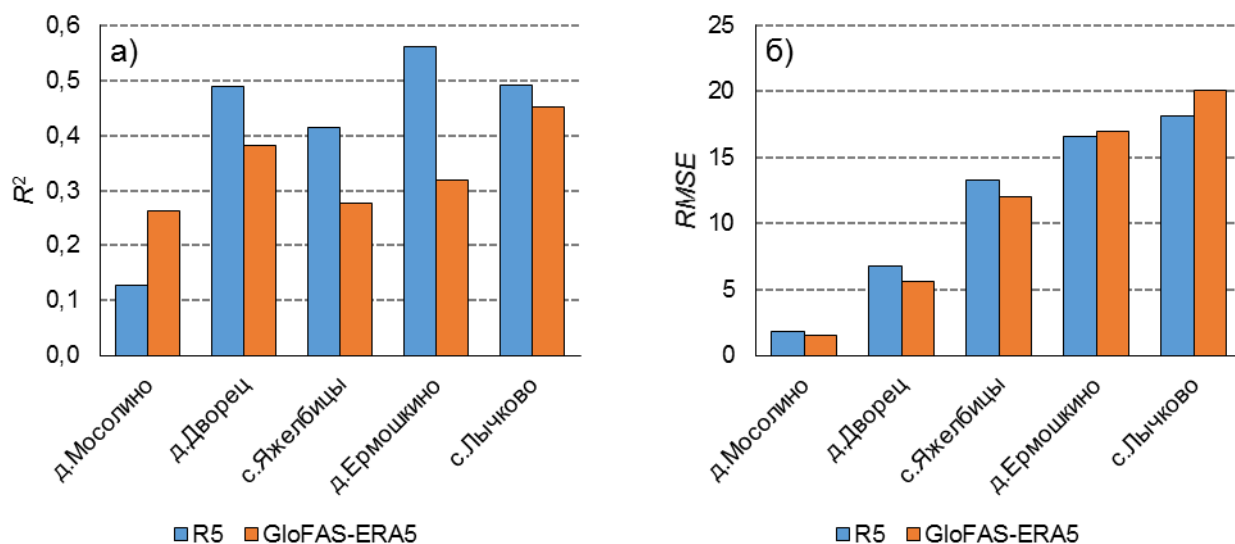


Рисунок 2.16 – Значения коэффициентов а) R^2 и б) $RMSE$

Оценки среднего значения максимального среднесуточного расхода воды дождевых паводков (\overline{Q}_M), полученные с помощью реанализов R5 и GloFAS–ERA5, занижены для всех постов (таблица 2.8). Однако, отклонение от оценок по наблюдаемым данным падает по мере увеличения площади водосбора. Так, минимальное отклонение наблюдается для гидрологического поста с. Лычково с площадью водосбора 2180 км² и составляет 0,8 %.

Таблица 2.8 – Результаты сравнения характеристик максимального среднесуточного расхода воды дождевых паводков

Источник	Период расчета	Параметры стока		Максимальный расход 10 % обеспеченности, м ³ /с
		\overline{Q}_M , м ³ /с	Cv	
р. Лонница – д. Мосолино				
наблюдения	1980-2016	2,15	0,67	4,07
R5	1980-2016	0,92	0,53	1,52
GloFAS-ERA5	1980-2016	1,25	0,32	1,79
р. Полометь – д. Дворец				
наблюдения	1980-2016	12,0	0,56	21,0
R5	1980-2016	7,33	0,49	12,2
GloFAS-ERA5	1980-2016	9,94	0,38	15,0
р. Полометь – с. Яжелбицы				
наблюдения	1980-2016	20,8	0,61	38,5
R5	1980-2016	11,8	0,55	20,2
GloFAS-ERA5	1980-2016	15,6	0,33	22,5
р. Полометь – д. Ермошкино				
наблюдения	1980-2016	30,7	0,64	58,2
R5	1980-2016	23,0	0,61	40,2
GloFAS-ERA5	1980-2016	25,0	0,39	38,7

Продолжение таблицы 2.8

р. Полометь – с. Лычково				
наблюдения	1980-2016	39,3	0,59	71,6
R5	1980-2016	39,0	0,63	71,2
GloFAS-ERA5	1980-2016	49,6	0,35	73,7

Полученные на основе использования реанализов стока оценки коэффициента вариации максимального среднесуточного расхода дождевых паводков (C_v) также являются заниженными по сравнению с оценками по наблюдаемым данным, однако, для реанализа R5 эти отклонения являются минимальными и не превышают 15 %, за исключением гидрологического поста р. Лонница – д. Мосолино (20,9 %).

Величины максимального среднесуточного расхода дождевых паводков 10 % обеспеченности, полученные с помощью реанализов стока, являются сильно заниженными (более 30 %) относительно рассчитанных на основе наблюдений, особенно для постов с площадью водосбора менее 2000 км². Как и в предыдущих случаях для поста р. Полометь – с. Лычково, полученные оценки, в целом показывают более близкие результаты и минимальные отклонения независимо от выбранного реанализа стока.

Полученный результат показывает, что данные реанализа стока могут быть использованы в целях оценки характеристик максимального дождевого стока только для водосборов с площадью более 2000 км², однако, наиболее точные результаты отмечаются все же по данным регионального реанализа.

Стоит отметить, что реанализы стока разрабатываются на основе тех же метеорологических реанализов, которые пока не способны учитывать не только интенсивность выпадения жидких осадков, но осадки редкой повторяемости, что влияет на результаты оценки характеристик максимального дождевого стока. Это связано с сильными неопределенностями в существующих оценках экстремальных осадков. Причины неопределенностей состоят в недостаточной обоснованности и противоречивости методов статистического оценивания экстремальных осадков, а также в несопоставимости оценок экстремальных осадков по разным данным [Золина, 2018].

Несмотря на то, что за последние десятилетия изучению атмосферных осадков был посвящен не один десяток работ, осадки остаются одним из наиболее неопределенных параметров для симуляции климатическими моделями, а без достоверных оценок экстремальных осадков невозможно получить надежные характеристики дождевого стока.

2.3.2 Современные изменения

Для оценки изменений характеристик дождевых паводков были использованы данные гидрологических наблюдений о максимальных срочных расходах воды на 53 постах, расположенных на незарегулированных малых и средних реках. В пределах выбранных бассейнов отсутствуют крупные озера и водохранилища, искажающие естественный водный режим объектов (рисунок 2.17).

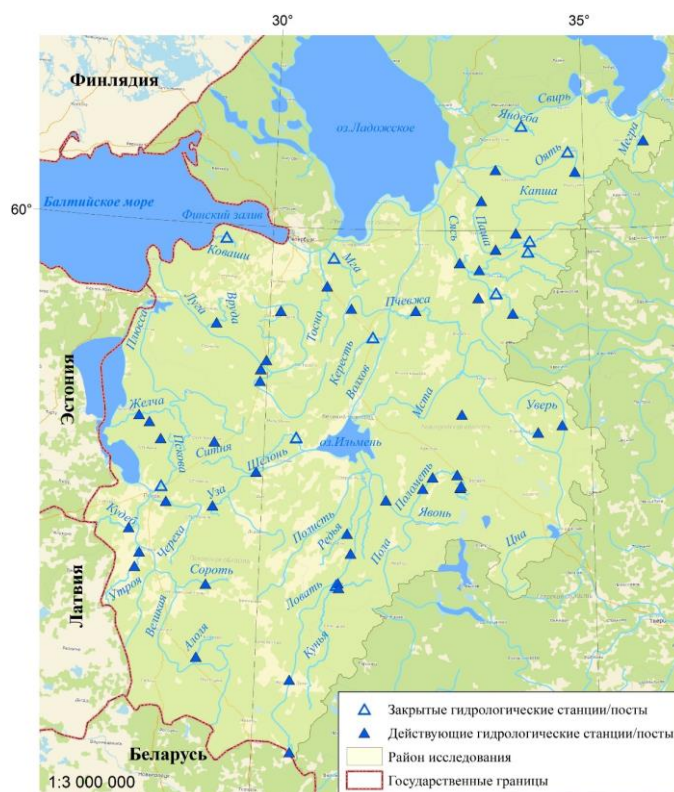


Рисунок 2.17 – Схема расположения гидрологических станций/постов на территории исследования

Анализ однородности и стационарности рядов был выполнен статистическими методами (критерии Фишера и Стьюдента, критерии Диксона, Смирнова–Граббса, оценка статистической значимости линейных трендов) [СП 33–101–2003; Методические рекомендации ..., 2010]. Значимость трендов оценивалась с помощью непараметрического теста Манна–Кендалла и методом И.И. Поляка [Mann, 1945; Rank Correlation Methods..., 1990; Поляк, 1975]. Оценка тренда проводилась методом Сена [Sen, 1968].

Из всего массива данных только один пост оказался неоднородным по критерию Стьюдента, а по критерию Фишера 12 постов из общего числа (23 % от общего числа). На

рисунке 2.18 представлены хронологические графики максимальных расходов дождевых паводков неоднородных по критерию Фишера.

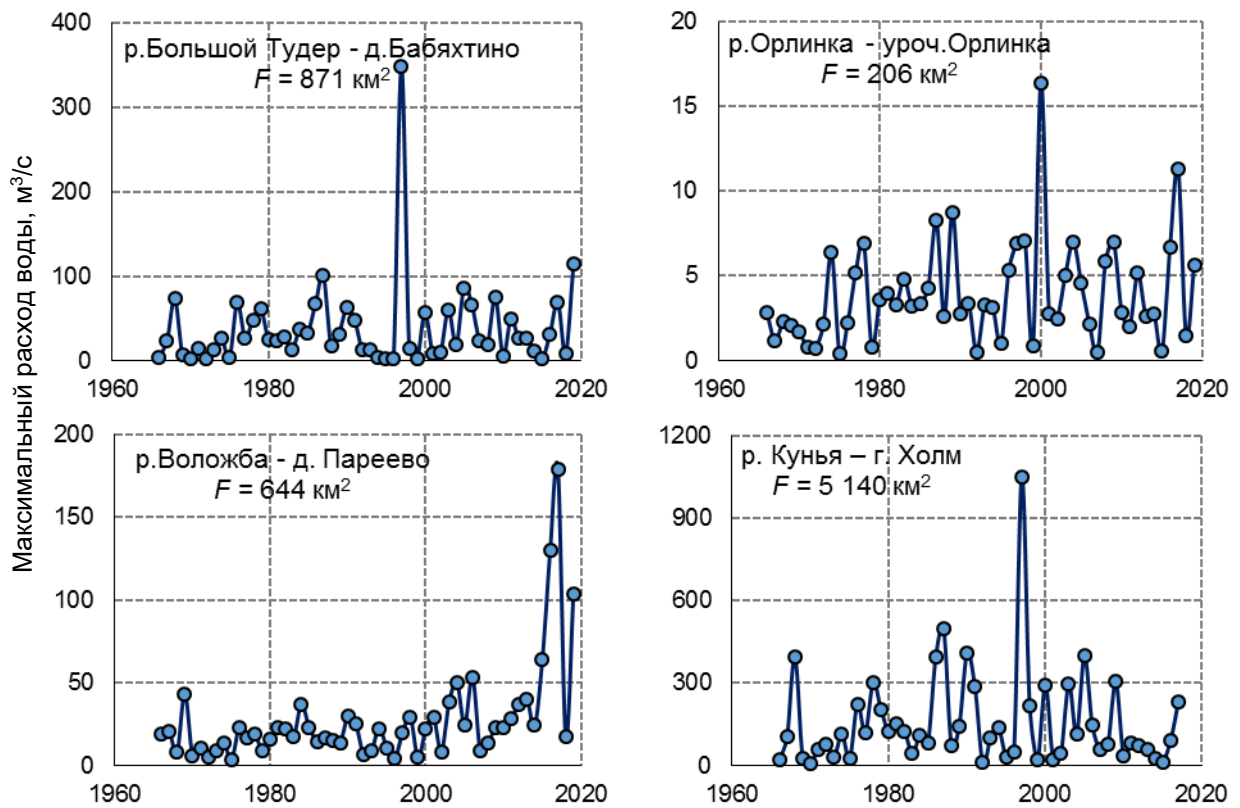


Рисунок 2.18 – Пример хронологических графиков максимальных расходов воды дождевых паводков неоднородных по критериям Фишера

В связи с этим дополнительно была проведена оценка однородности рядов по критериям Диксона и Смирнова–Грabbса.

В рамках статистического анализа было выявлено, что ряды максимальных расходов дождевых паводков можно считать однородными, однако 14 постов из всего числа являются неоднородными по критериям Диксона и Смирнова–Грabbса. Их неоднородность обусловлена прохождением максимального расхода воды более редкой повторяемости, что не говорит о неоднородности всего ряда в целом.

Для 37 постов (70 % от общего числа) установлено наличие положительного тренда максимальных расходов воды дождевых паводков, при этом только для 10 постов (19 %) тренд является статистически значимым. Наиболее увеличение наблюдается в бассейнах рек Мга и Воложба (18 и 17 %, соответственно, за 10 лет).

В среднем для российской части бассейна Балтийского моря линейный тренд составляет 5,7 % / 10 лет (рисунок 2.19).

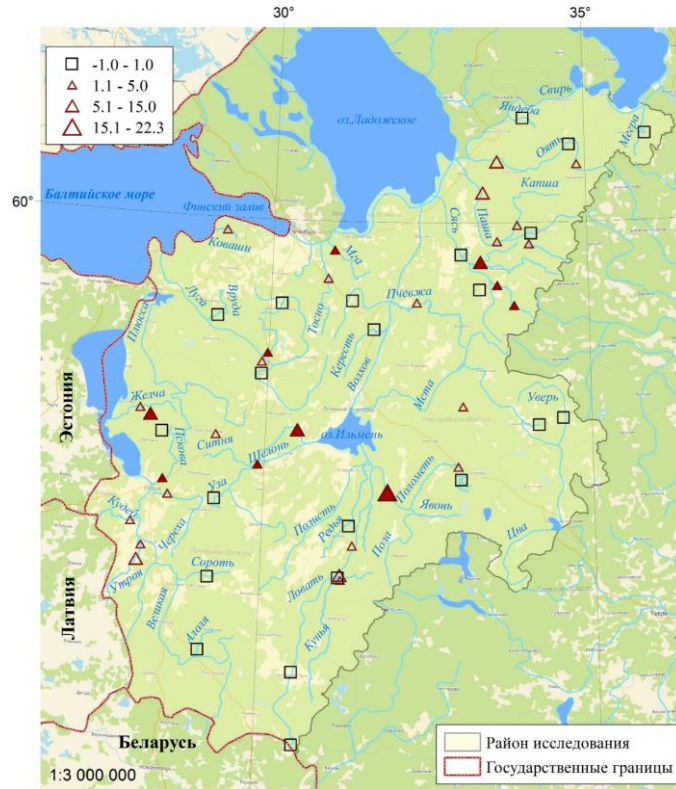


Рисунок 2.19 – Линейные тренды максимальных расходов воды дождевых паводков за период 1966 – 2019 гг., м³/с за 10 лет. Заливкой выделены станции со значимым трендом ($\alpha = 0,05$)

За последние годы на некоторых реках Северо–Запада России были зарегистрированы наивысшие за весь период наблюдений максимальные расходы воды (р. Воложба, Полометь), сформированные в период прохождения дождевых паводков и вызванные большим количеством осадков, а на ряде рек (р. Воложба, Тихвинка, Пчевжа, Уверь, Вельгия, Пола, Полометь, Ловать, Большой Тудер, Ситня, Луга, Плюсса, Желча, Великая, Алоля, Сороть, Утроя, Череха) в 2019 году также наблюдались дождевые паводки, максимальный расход воды которых превышал максимум половодья соответствующего года. Данные примеры показывают, что случаи превышения максимума дождевого стока над максимумом половодья возможны и являются не характерными для этого региона страны.

В работе также проведена оценка соотношения дождевых и снеговых максимумов и изменение их за два многолетних периода – предшествующий (до 1966 г.) и современный (после 1966 г.). Для оценки соотношения дождевых и снеговых максимумов стока использовался коэффициент α , как отношение максимальных расходов $Q_{1\%}$ дождевого и снегового происхождения [Соколов, 1965]:

$$\alpha = \frac{Q_{д1\%}}{Q_{с1\%}}, \quad (2.4)$$

где $Q_{д1\%}$ и $Q_{с1\%}$ это максимальные расходы воды дождевых (летних) и снеговых (весенних паводков) 1 %-ной обеспеченности.

На рисунке 2.20 дана схема районирования соотношения по территории Северо-Запада за 2 многолетних периода. Как видно на рисунке 2.20а, почти повсеместно для периода до 1966 г. оно составляло 0,4 – 0,5. Уменьшение до 0,3 в бассейнах рек Луги, Плюсы, нижнего течения Великой и увеличение до 0,8 – 1,0 в бассейнах рек Керести, Мсты Полы и Поломети [Ресурсы...].

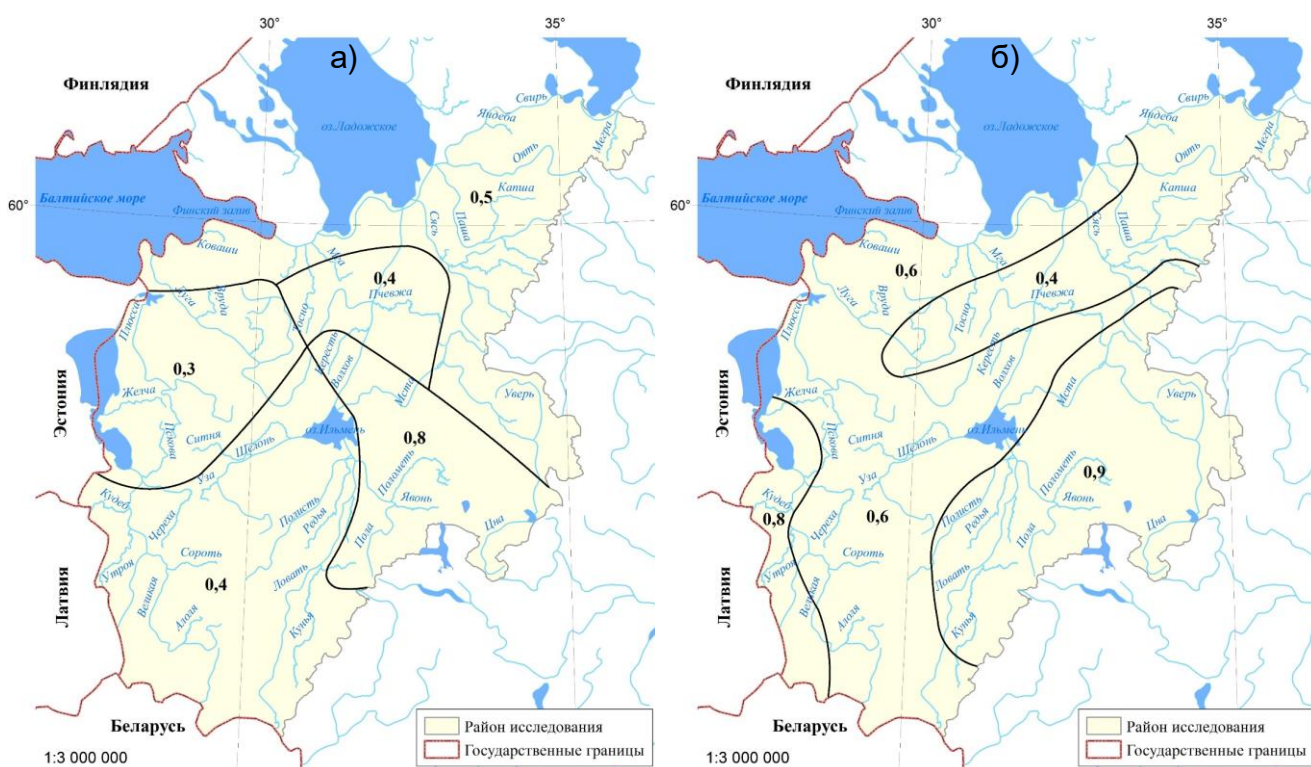


Рисунок 2.20 – Схема районирования соотношений максимальных расходов $Q_{1\%}$ дождевого и снегового происхождения а) до 1966 г. и б) после 1966 г.

Согласно рисунку 2.20б, характеризующий современный период, на всей рассматриваемой территории произошло увеличение данного соотношения. Также выделяются бассейны рек Мсты Полы, Поломети, где значение соотношения дождевых и снеговых максимумов наиболее высокое и составляет до 0,9 – 1,0, в некоторых случаях может достигать до 1,2 – 1,5.

В таблице 2.9 представлены наибольшие наблюдаемые максимальные расходы воды дождевых паводков (Q_1) и весенних половодий (Q_2) за 2 многолетних периода на некоторых реках исследуемого региона, а также максимальные расходы 1 %-ной обеспеченности.

Таблица 2.9 – Соотношение дождевых и снеговых максимумов за 2 многолетних периода

Река – пункт	Площадь водосбора, км ²	Период наблюдений	Максимальные расходы воды, м ³ /сек				
			наибольший наблюдаемый		1 %-ный		
			дождевой Q_1	снеговой Q_2	дождевой Q_1	снеговой Q_2	$\frac{Q_1}{Q_2}$
р. Мга – д. Горы	709	1932–1965	64,2	123	73,6	140	0,53
		1966–2018	105	128	97,6	141	0,69
р. Тосна – ст. Тосно	1300	1944–1965	79,4	206	103	272	0,38
		1966–2019	91,3	208	97,8	199	0,49
р. Паша – д. Поречье	1110	1935–1965	165	219	191	232	0,82
		1966–2014	93,6	299	100	271	0,37
р. Паша – с. Часовенское	5710	1935–1965	762	890	804	1100	0,73
		1966–2019	441	882	483	946	0,51
р. Воложба – д. Пареево	644	1952–1965	54,1	107	95,4	149	0,64
		1966–2018	179	158	194	150	1,29
р. Тихвинка – д. Горелуха	2070	1936–1965	312	446	332	394	0,84
		1966–2018	137	303	132	292	0,45
р. Ловать – г. Великие Луки	3270	1928–1965	94	238	116	246	0,47
		1966–2019	108	165	111	162	0,69
р. Ловать – г. Холм	14700	1912–1965	903	2130	1050	2010	0,50
		1966–2019	2070	1560	1863	1545	1,21
р. Кунья – г. Холм	5140	1932–1965	514	885	530	983	0,54
		1966–2017	1050	746	957	756	1,27
р. Луга – ст. Толмачево	6350	1916–1965	188	800	224	850	0,26
		1966–2019	205	526	199	519	0,38
р. Плюсса – д. Брод	5090	1936–1965	168	658	242	718	0,34
		1966–2019	281	559	263	566	0,46
р. Сороть – д. Осинкино	3170	1916–1965	188	309	207	389	0,53
		1966–2019	156	267	163	279	0,58
р. Утроя – д. Большая Губа	2970	1935–1965	150	397	174	468	0,37
		1966–2019	220	248	200	274	0,73

Анализ таблицы показывает, что на подавляющем большинстве рек наибольшие наблюдаемые, а также максимальные расходы воды весеннего половодья 1 %-ной обеспеченности выше наибольших расходов дождевых паводков. Однако случаи превышения половодий дождевыми паводками нередки и наблюдаются как на малых, так и средних реках.

Помимо оценки максимальных расходов воды дождевых паводков, проводился анализ числа лет с превышением значения максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья. Для анализа использовались данные гидрологических наблюдений о максимальных расходах воды дождевых паводков и весенних половодий по 41 гидропосту на малых и средних реках на территории Северо-Запада России, в пределах южной части бассейна Финского залива Балтийского моря, за период 1966 – 2019 гг. с продолжительностью наблюдений не менее 49 лет. На исследованной территории с конца 1980-х годов отмечается резкое увеличение числа случаев превышения максимального расхода

дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья соответствующего года (рисунок 2.21).

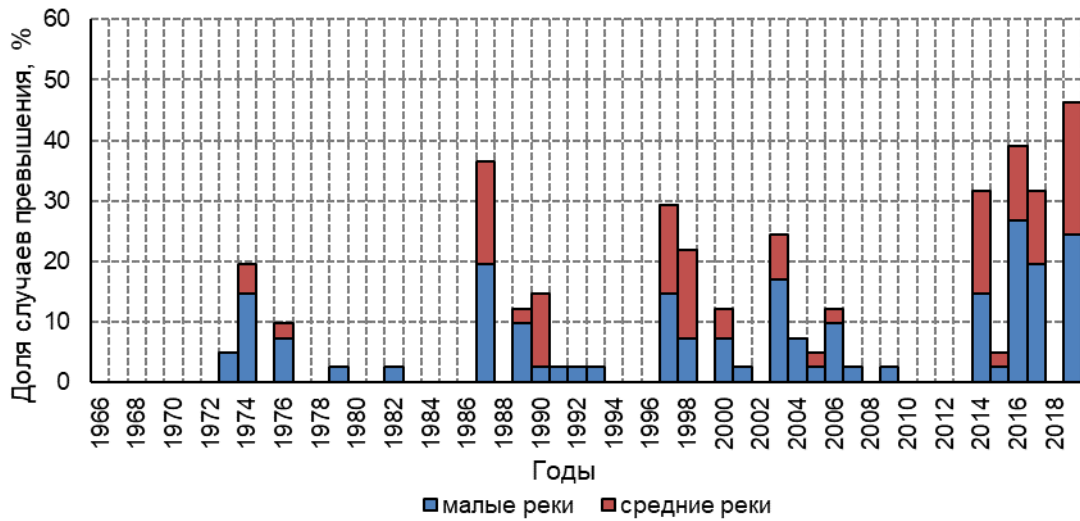


Рисунок 2.21 – Доля случаев превышения (%) максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья в пределах района исследований за период с 1966 по 2019 гг.

Частота превышения максимальных расходов воды дождевых паводков над расходами весенних половодий, выраженная в процентах от общего количества лет наблюдений, приведенная на рисунке 2.22, существенно различается в разных частях района исследования.

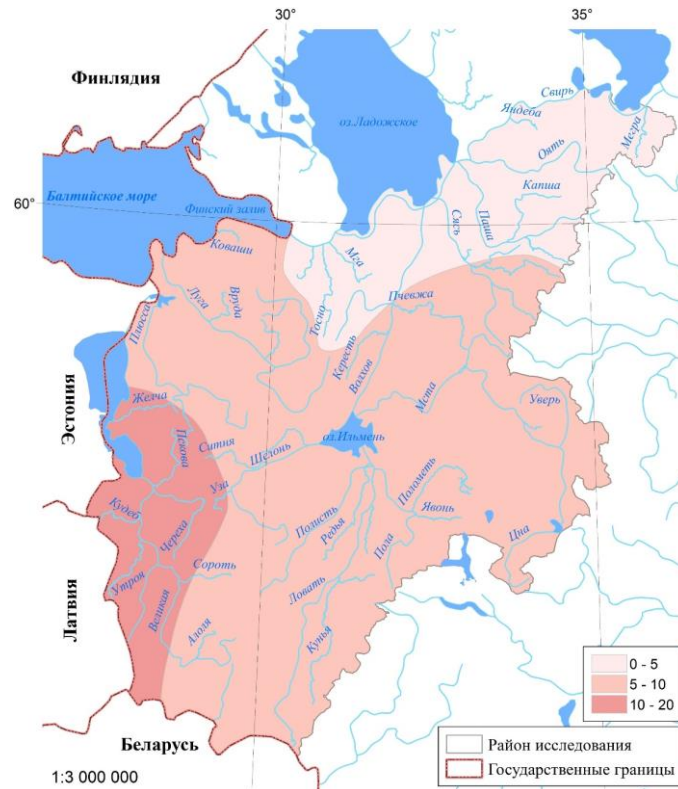


Рисунок 2.22 – Число случаев (%) превышения максимального расхода дождевых паводков над максимальным расходом воды половодья на реках территории исследования за период с 1966 по 2019 гг.

На реках бассейна Ладожского озера и частного бассейна Невы превышение максимальных расходов воды дождевых паводков над максимумами весенних половодий наблюдается крайне редко и лишь на малом числе рек не наблюдаются вовсе.

Превышение половодий дождевыми паводками на многих притоках Псковско–Чудского озера происходит чаще, чем на остальной территории, – в среднем в 15 % случаев. Особенно часто это наблюдается на р. Кудеб, Череха и Утря.

Данная тенденция объясняется не только увеличением доли дождевого стока в годовом [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]. Основным фактором снижения максимального стока половодья, предположительно, является увеличение доли жидких осадков на фоне более частых оттепелей в зимний период [Журавлев и др., 2017]. На рисунке 2.23 приведены хронологические графики максимальных расходов воды дождевых паводков и весеннего половодья, описывающие текущую тенденции максимального стока рек Северо–Запада.

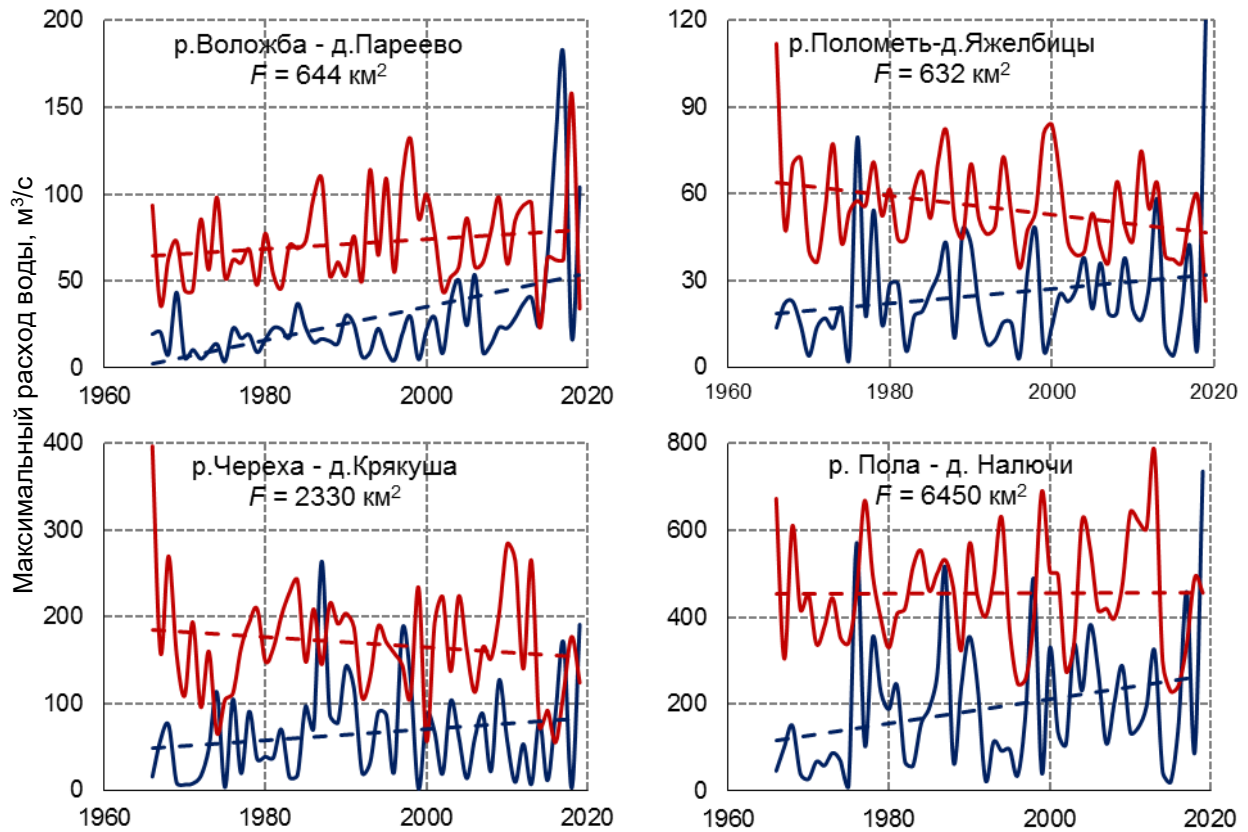


Рисунок 2.23 – Максимальные расходы воды, $\text{м}^3/\text{с}$ дождевых паводков (синий) и весеннего половодья (красный), за период 1966 – 2019 гг. и их линейные тренды

Таким образом, максимальные расходы воды паводков могут превышать максимальные расходы воды половодий на всех реках района исследования. При этом если на одних реках такие факты единичны (бассейн р. Нева), то на других – довольно часты (притоки Псковско–Чудского озера).

Стоит отметить, что границы областей изменений максимальных расходов воды и характеристик атмосферных осадков, таких как суточный максимум и суммы осадков за теплый период не совпадают. На рисунке 2.19 показан неоднородный (пестрый) 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).

Глава 3 Моделирование дождевых паводков с использованием различных типов данных

В последние годы, в связи с растущей потребностью в повышении точности и оперативности представления гидрометеорологических данных, растет интерес к метеорологическим радиолокаторам. В данном исследовании для оценки применимости данных локатора в гидрологических целях были использованы наземные и радиолокационные данные об атмосферных осадках и модель Soil and Water Assessment Tools (SWAT), адаптированная для бассейна р. Полометь.

3.1 Описание модели SWAT

Модель SWAT может использоваться для моделирования как одного водосбора, так и системы из нескольких гидрологически связанных водосборов. Каждый водосбор сначала делится на суббассейны (частные или элементарные водосборы), а затем те в свою очередь подразделяются на гидрологические единицы реагирования (HRUs – hydrologic response units), характеризующиеся однородными условиями землепользования, растительного покрова, элементов рельефа и характеристик почв [Soil and Water Assessment Tool...2011].

Модель имеет временной интервал расчетов 24 часа (сутки) или меньше, физически обоснована, оптимальна с точки зрения компьютерных технологий, опирается на существующие распространенные типы ГИС-технологий, полностью совместима с ArcGIS [Arcswat Interface For Swat 2012...2013].

Основой SWAT модели является уравнение водного баланса.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}), \quad (3.1)$$

где i – расчетный шаг модели (сутки, от 1 до t), SW_t – содержание влаги в почве на конец расчетного периода $i = t$, мм; SW_0 – содержание влаги в почве в начальный момент расчетного периода, мм; R_{day} – суточный слой осадков, мм; Q_{surf} – поверхностный сток, мм; E_a – эвапотранспирация, мм; w_{seep} – количество воды, которая просачивается в зону аэрации через почвогрунты, мм; Q_w – грунтовый сток, мм.

В качестве входной информации в модель используются данные метеорологических наблюдений: количество атмосферных осадков, суточные данные об относительной влажности и температуре воздуха (максимальной и минимальной), скорости ветра, солнечной радиации.

Модель SWAT разделяет осадки на дождь и снег, используя среднесуточное значение температуры воздуха. Процесс таяния снега описывается линейной функцией от температуры воздуха, высоты снежного покрова и площади покрытия снегом водосбора. Часть атмосферных осадков может быть перехвачена растительным покровом и испариться. Вода, достигшая поверхности почвы, может просочиться в почвенный профиль или перейти в поверхностный сток. Содержащаяся внутри почвенного профиля влага может испариться или попасть в почвенный или грунтовый сток.

Фактическое испарение рассчитывается из потенциального, которое в зависимости от данных наблюдений может быть вычислено 3 методами: Пенмана–Монтиса, Престли – Тейлора и Харгрейвса. В первую очередь рассчитывается количество испаряющихся осадков, перехваченным растительным покровом, затем – максимальные и фактические значения транспирации и испарения с почвы. При наличии снежного покрова учитывается процесс сублимации.

Движение воды в почвенном профиле обусловлено различным содержанием в нем влаги. Нисходящий поток гравитационной влаги образуется только при условии превышения полевой влагоемкости слоя, в то же время нижележащий слой должен быть не насыщен водой. Если температура в определенном слое равна или ниже 0 °С, то движение влаги в этом слое прекращается, при этом миграция влаги к фронту промерзания не учитывается. Скорость потока регулируется скоростью фильтрации слоя.

Вода, просочившаяся ниже зоны корней, разделяется между двумя водоносными горизонтами: неглубоким (безнапорным), питающим реки в пределах водораздела, и глубоким водоносным горизонтом, воды которого разгружаются за пределами водосбора (безвозвратные потери). Изменение количества водоносных горизонтов не предусмотрено.

Поверхностный сток формируется, если интенсивность выпадения осадков превышает скорость фильтрации. Объем поверхностного стока вычисляется с использованием эмпирического метода номерных кривых (SCS CN) или метода инфильтрации (Green & Ampt) метода инфильтрации. В методе SCS CN, номер кривой изменяется нелинейно в зависимости от влажности почвы. Номер кривой уменьшается по мере приближения почвы к влажности завядания и увеличивается примерно до 100, когда почва приближается к насыщению. Метод Грина-Ампта требует срочных данных об осадках и рассчитывает инфильтрацию в зависимости от матричного потенциала фронта увлажнения и эффективного коэффициента фильтрации. То, что не проникает в почву, становится поверхностным стоком.

Расчет движения воды по русловой сети может выполняться двумя способами:

1) методом Маскингам, основанным на совместном решении уравнения водного баланса участка реки и зависимости объема воды на участке от расходов воды;

2) методом, основанным на вычислении коэффициента отношения среднего расхода и объема воды на участке русловой сети на каждом расчетном временном шаге.

Значение максимального расхода воды рассчитывается с помощью обновленной рациональной формулы стока. В этом методе максимальный сток является функцией от доли суточных осадков, выпадающих на водосбор, суточного объема поверхностного стока и общего времени добегания. Время добегания оценивается по формуле Маннинга с учетом склонового и руслового коэффициента шероховатости.

Полное описание концептуальных основ, уравнений и переменных, формата и состава файлов ввода и вывода, исходный код, пользовательские интерфейсы подготовки моделирования для наиболее известных ГИС–приложений и инструменты калибровки для модели размещены в открытом доступе на веб–сайте Техасского университета A&M [<http://swat.tamu.edu>].

В работе использован исходный код модели SWAT 2012.v.670. ГИС–интерфейс ArcSWAT 2012 для ESRI ArcGIS 10.4 используется для настройки и параметризации модели. Оценка чувствительности параметров модели выполнялась с помощью SUFI–2 в программном модуле SWAT–CUP.

3.2 Объект моделирования

Объектом моделирования была выбрана река Полометь, протекающая в пределах Новгородской области (рисунок 3.1) и являющаяся главным объектом исследований условий формирования стока и русловых процессов Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ». По данным государственного водного реестра России река Полометь относится к Балтийскому бассейновому округу.

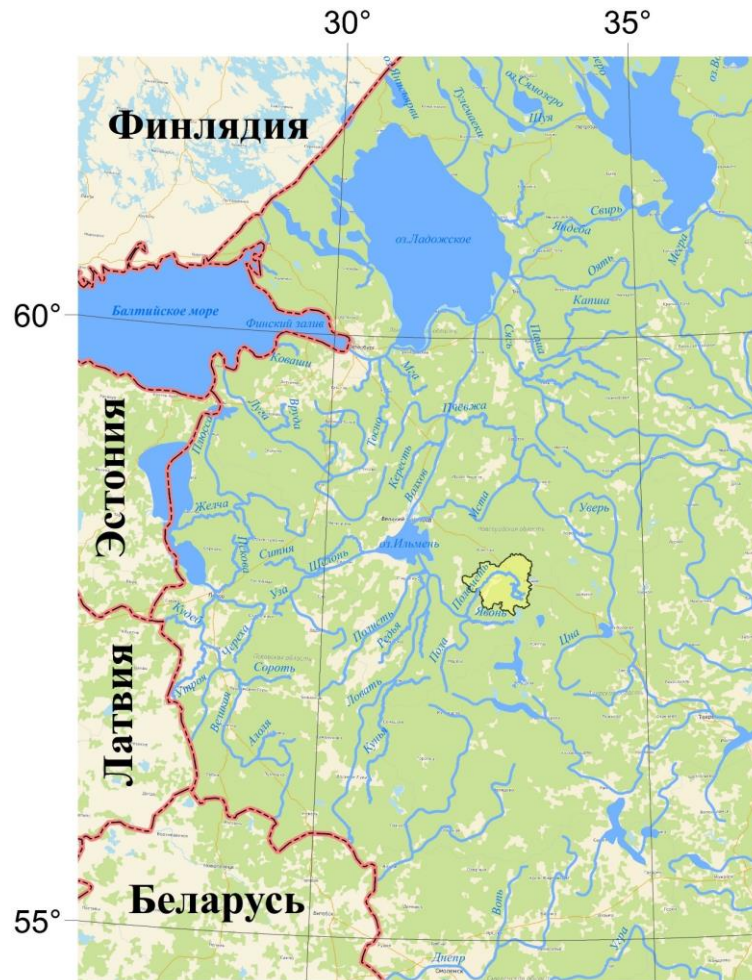


Рисунок 3.1 – Схема расположения объекта исследования

Рельеф, геология, и гидрография бассейна реки Полометь

Бассейн реки Поломети расположен на северо–западном склоне Валдайской возвышенности. Река Полометь берёт начало из озера Русское и является правобережным притоком Полы, впадающей в озеро Ильмень. Длина р. Поломети составляет около 150 км, площадь водосбора – 2770 км².

Рельеф и состав верхних слоев осадочных пород в бассейне р. Поломети чрезвычайно разнообразны и взаимосвязаны. Они образовались в период последнего оледенения под действием различного типа процессов, сопровождавших отступление ледника с вершины и северо–западного проксимального склона возвышенности. Рельеф бассейна р. Поломети, предопределяет и пространственное положение путей стекания вод и границы водосборных поверхностей всех элементов речной сети, т. е. гидрографическую структуру бассейна. Рельеф верховьев бассейна определяется его положением на вершине Валдайской возвышенности (рисунок 3.2). Особое значение в рельефе бассейна имеют котловины, занятые при отступлении ледника мертвыми массами льда, сохраненные этим от заполнения осадочным материалом, и

представленные, в современном состоянии, котловинами озер. Суммарная площадь озер в бассейне озера Русского составляет 5,8 км². Этим обстоятельством определяется заметное регулирование стока реки Полометь в ее верхнем течении. Ниже по склону встречаются также озерные котловины, образовавшиеся в результате ледникового выпахивания.

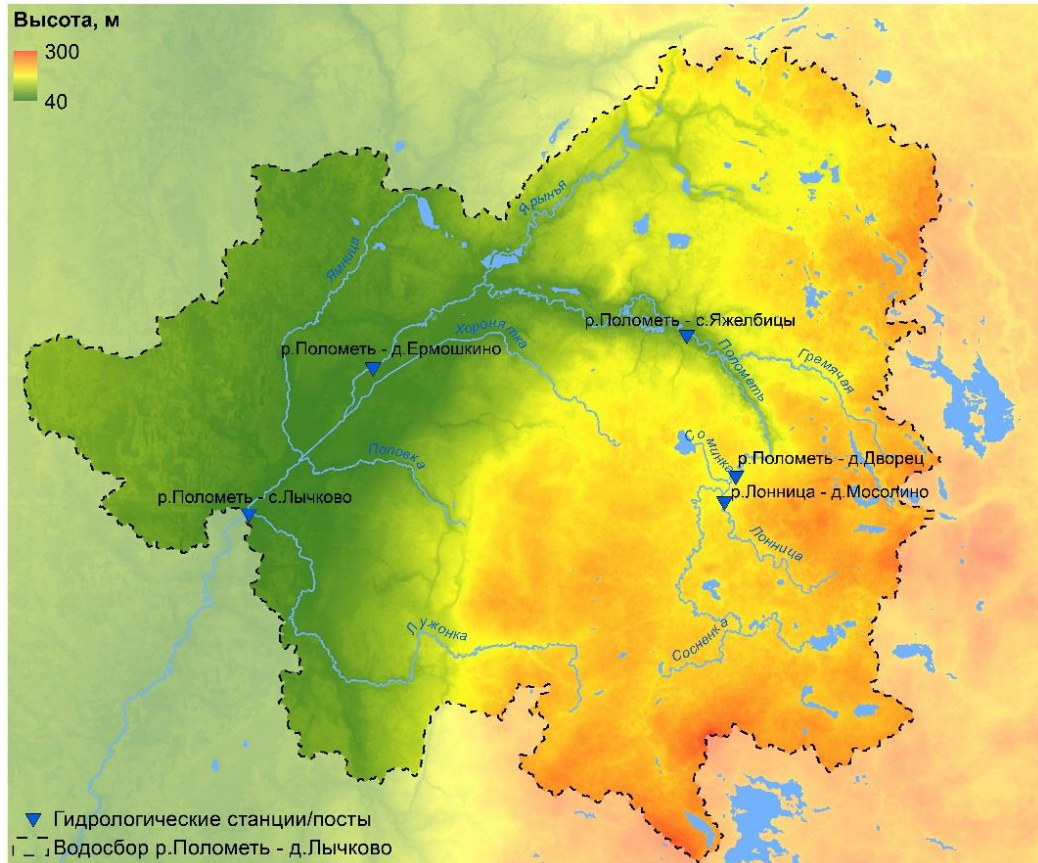


Рисунок 3.2 – Карта–схема высот бассейна р. Полометь до поста с. Лычково

Первым значимым притоком в верхней части ее бассейна р. Полометь является река Соснинка длиной 27 км и с площадью водосбора 167 км². Эта река стекает с наиболее высокого из расположенных в этой части Валдайской возвышенности холмов конечной морены сложенных валунными суглинками. Бассейну этого притока свойственны высокие уклоны и густота речной сети, а также практическое отсутствие озерного регулирования.

У д. Дворец в р. Полометь справа впадает р. Лонница, стекающая со склонов возвышенности, а слева р. Соминка, сток которой формируется в условиях озерно–ледниковой равнины. Перед с. Яжелбицы р. Полометь принимает в себя сток значительного притока – полугорной реки Гремячая, бассейн которой существенно осложнен формами камово–озового рельефа. В границах с. Яжелбицы впадает еще один правый приток, но со значительно меньшим по площади бассейном [Кокорева и др., 2005].

На участке между постами д. Соменка и д. Ракушино р. Полометь принимает значительный приток реки Ярынья. Перед д. Ермошкино пойма р. Полометь фактически исчезает, превращаясь за правой бровкой русла в обширную заболоченную низину. Перед замыкающим створом ПГТ Лычково (в 3–х км от него) с левого берега в Полометь впадает второй по величине бассейна приток – р. Луженка.

Гидрологическая изученность

На разных участках русла реки Полометь действовало до 8 гидрологических постов, из которых в настоящее время действуют 4 поста: д. Дворец, с. Яжелбицы, д. Ермошкино и ПГТ Лычково. Кроме того, на 5 притоках р. Полонети – реках: Соснинке, Лоннице, Соминке, Олешенке (притоке р. Гремячей) и Хоронятке в середине 1930–х годов были открыты посты для изучения особенностей режима стока, формирующегося в специфических условиях ландшафта их бассейнов. В конце 1950–х годов посты на всех пяти притоках были восстановлены и действовали в течение десятилетия. В 2011 году возобновлено действие трех из этих постов с применением современных электронных уровнемеров. Список всех постов, действовавших на реке Полометь и ее притоках представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Список всех постов, действовавших на р. Полометь и ее притоках

Название водного объекта и пункта наблюдений	Код пункта наблюдений	Расстояние		Площадь водосбора реки, (км ²)	Период действия	
		(км) от			открыт	закрыт
		истока	устья			
р. Полометь – х. Полометь	72430	3,0	147	139	01.04.1956	31.12.1967
р. Полометь – д. Дворец	72432	36	114	432	17.10.1936	Действ.
р. Полометь – с. Яжелбицы	72433	52	98	631	01.08.1951	Действ.
р. Полометь – д. Соменка	72436	74	76	776	01.04.1959	30.11.1991
р. Полометь – д. Ракушино		85	65	1168		
р. Полометь – д. Зеленый Бор		89	61	1174		
р. Полометь – д. Ермошкино	72434	97	52	1180	10.09.1952	Действ.
р. Полометь – с. Лычково	72435	112	38	2180	01.01.1960	Действ.
р. Соснинка – д. Киты	72440	22	1,0	101	01.04.1934	31.12.1968
р. Лонница – д. Мосолино	72441	17	0,8	48,3	01.04.1934	Действ.
р. Соминка – д. Дворец	72442	12	1,15	32,3	13.07.1935	31.12.1968
					08.01.2011	Действ.
р. Олешенка – д. Миронег	72444	5,3	–	31,9	01.04.1958	31.05.1968

Метеорологические наблюдения

Осадкомерные пункты. В настоящей момент наблюдения за атмосферными осадками проводятся в 5 пунктах в бассейне р. Полометь, принадлежащие Валдайскому филиалу ФГБУ «ГГИ», а также в 2 пунктах на сопредельной территории, относящиеся к государственной сети

Росгидромет Северо–Западного УГМС (таблица 3.2). Наблюдения на всех пунктах производятся с помощью осадкомера Третьяков. С ноября 2019 г. на осадкомерном пункте Яжелбицы установлен автоматический pluviограф «Pluvio», ведущий непрерывные наблюдения за количеством и интенсивностью осадков.

Таблица 3.2 – Основные сведения об действующих осадкомерных пунктах

№	Пункт	Оборудование	Широта	Долгота	Высота, м	Дата открытия	Сеть
1	Таежный	осадкомер	57,97	33,33	203	01.01.1950	ГГИ (спецсеть)
2	Дворец	осадкомер	57,93	33	160	01.07.1951	ГГИ (спецсеть)
3	Яжелбицы	осадкомер	58,03	32,98	80	24.08.1949	ГГИ (спецсеть)
		плювиограф				01.11.2019	
4	Ермошкино	осадкомер	58,01	32,58	57	11.09.1957	ГГИ (спецсеть)
5	Лычково	осадкомер	57,92	32,4	55	01.08.1949	ГГИ (спецсеть)
6	Валдай	осадкомер	57,98	33,25	200	01.12.1939	ГГИ (ГНС Росгидромета)
		плювиограф					
7	Демянск	осадкомер	57,65	32,47	59	01.04.1943	СЗ УГМС (ГНС Росгидромета)

Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С «Валдай», установлен в Валдайском районе, с. Зимогорье и работает с 2012 г. Он позволяет отслеживать перемещение различных погодных структур и явлений, а именно обеспечивает метеорологической информацией об облачности и осадках. Предназначен для создания краткосрочных прогнозов погоды. Радиус его действия — 250 км.

3.2.1 Краткая климатическая характеристика района исследования

Климат Валдая умеренно-континентальный. Важную роль в формировании играет атмосферная циркуляция. Для района характерна большая повторяемость воздушных масс атлантического происхождения, что и определяет морские черты его климата: сравнительно мягкую зиму, прохладное лето, достаточное увлажнение и частое выпадение осадков. В холодное полугодие циклонические процессы усиливаются, а в теплое, как правило, несколько ослабевают. Активная циклоническая деятельность и частая смена воздушных масс определяют неустойчивый режим погоды во все сезоны. При этом в течение всего года по общей облачности наиболее устойчива пасмурная погода.

В зависимости от того, какие воздушные массы проникают на Русскую равнину, устанавливается различный характер погоды. При поступлении воздушных масс, формирующихся над Атлантическим океаном, в районе Валдайской возвышенности господствуют ветры южных и юго-западных направлений. Зимой в таких случаях

устанавливается мягкая погода с частыми оттепелями и значительным количеством атмосферных осадков. Летом эти воздушные массы поступают на Русскую равнину обычно трансформированными в континентальный воздух. При длительном нахождении этого воздуха в умеренных широтах сохраняется устойчивая теплая и сухая погода. Если на пространство Русской равнины поступают массы арктического воздуха, то зимой они обуславливают резкое и быстрое понижение температуры воздуха, сильные морозы и ясную погоду. Весной и осенью эти воздушные массы вызывают существенное похолодание, часто сопровождающееся заморозками. Таким образом, в течение всего года происходит смена воздушных масс морского, континентального и арктического происхождения, что приводит к резким колебаниям погодных условий, а это обуславливает значительную изменчивость метеорологических элементов, с которой связаны и характеристики климата.

Средняя годовая температура воздуха за многолетний период $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Самый холодный месяц – январь, его средняя температура $-9,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, самый теплый – июль ($17,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Абсолютный минимум $-46,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ отмечен в январе 1940 г., абсолютный максимум $36,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в августе 2010 г. Для Валдая характерны зимние оттепели с положительными максимальными температурами воздуха, достигающими $8 - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в отдельные зимы, что приводит к интенсивному таянию снежного покрова, а в малоснежные зимы и его сходу. Годовая сумма осадков за многолетний период (1939 – 2019 гг.) – 736 мм, большая часть из которых выпадает в жидком виде. В течение года наименьшее количество осадков выпадает в феврале (35 мм), наибольшее – в июле (88 мм). Распределение осадков от года к году и внутри года весьма неравномерно. Наименьшая годовая сумма осадков была в 1941 г. – 476 мм, наибольшая в 2019 г – 1147 мм. Изменчивость месячных сумм осадков чрезвычайно велика, особенно в теплый период года. В отдельные годы месячные количества осадков в зависимости от условий атмосферной циркуляции могут значительно отклоняться от многолетнего среднего значения. Так, за период 1939 – 2019 гг. наибольшее количество осадков за месяц наблюдалось в июле 1998 г. – 226 мм, наименьшее – 0,9 мм в 1987 г.

Первый (временный) снежный покров образуется в последних числах октября. Как правило, он сразу же сходит, поскольку почва еще недостаточно промерзла, а также в это время высока активность западного переноса, что позволяет среднесуточной температуре оставаться положительной, когда значительно преобладает пасмурная и иногда очень теплая погода.

Устойчивый снежный покров и общий зимний характер погоды устанавливается в конце ноября. Наибольшая средняя декадная высота снежного покрова равна 43 см. Наибольшая из максимальных декадных высот снежного покрова составляет 73 см и приходится на первую декаду марта. Средняя дата схода снежного покрова – середина апреля. Однако в последние годы из-за изменения климата эти сроки существенно сдвинулись: зимой 2006 – 2007 гг.

существенного снежного покрова не было до второй половины января, а зимы 2013 – 2014 гг. и 2019 – 2020 гг. стали самыми малоснежными за весь период наблюдений.

Общий характер ветра определяется главным образом условиями и интенсивностью атмосферной циркуляции, но зависит также от термодинамических свойств воздушных масс, поступающих в данный район, от шероховатости подстилающей поверхности и орографических особенностей местности. Преобладающим является ветер юго-западного, западного и южного направлений. Распределение ветра по сезонам имеет некоторые особенности: зимой и осенью наиболее часто повторяются ветры юго-западного и южного направлений, весной – юго-западного и восточного направлений, летом – юго-западного и западного направлений. Наибольшая скорость ветра наблюдается в зимние месяцы. Наиболее редкие и слабые – ветры северо-восточных румбов. Максимальная скорость за год составляет 20 м/с, максимальный порыв – 30 м/с, который был зарегистрирован при грозе в августе 1982 г.

3.2.2 Особенности формирования дождевых паводков бассейна р.Полометь

Бассейн р. Полометь расположен на западном склоне Валдайской возвышенности. Рельеф бассейна р. Полометь пересеченный, общий характер местности холмисто-озерный. Наивысшая точка находится на юге в районе д. Рыжоха, и достигает 120 м над дном долины. Наименьшие высоты сосредоточены в нижней, северной части бассейна. Средняя часть бассейна характеризуется сравнительно плавным рельефом. На северо-востоке проходит цепь моренных гряд с высотами 60 – 80 м над дном долины. Около 70 % площади занято лесами, с преобладанием хвойных пород, кустарниками и залесенными болотами, остальная часть занята пашнями, лугами, озёрами и открытыми болотами.

Данный район является одной из наиболее влажных областей Северо-Запада России. Здесь выпадает более 700 мм осадков в год, на наветренных склонах 800 – 900 мм, а в некоторых районах годовые суммы могут превышать и 1000 мм. За счет влияния возвышенности в теплое время года здесь также наблюдается увеличение количества осадков по сравнению с остальной частью Северо-Запада (более 550 мм, в отдельные годы более 700 мм) и составляет более 60 % от годового. Максимум количества осадков приходится на июль – август. В среднем за каждый этот месяц выпадает около 90 мм осадков. Так как для данной местности характерна сильная неравномерность распределения летних осадков по территории, обусловленная как перепадом высот, так и наличием различных элементов рельефа и ландшафта, величина суточных максимумов может быть различна как по годам, так и по территории. На рисунке 3.3 представлено распределение количества осадков за ливень, прошедший 12 июня 2020 г. на территории исследуемого водосбора, полученное с помощью метеорологического локатора

ДМРЛ-С «Валдай». По радиолокационным данным данный ливень отличался сильной неоднородностью выпадения с образованием нескольких очагов с количеством осадков более 20 мм и даже 30 мм.

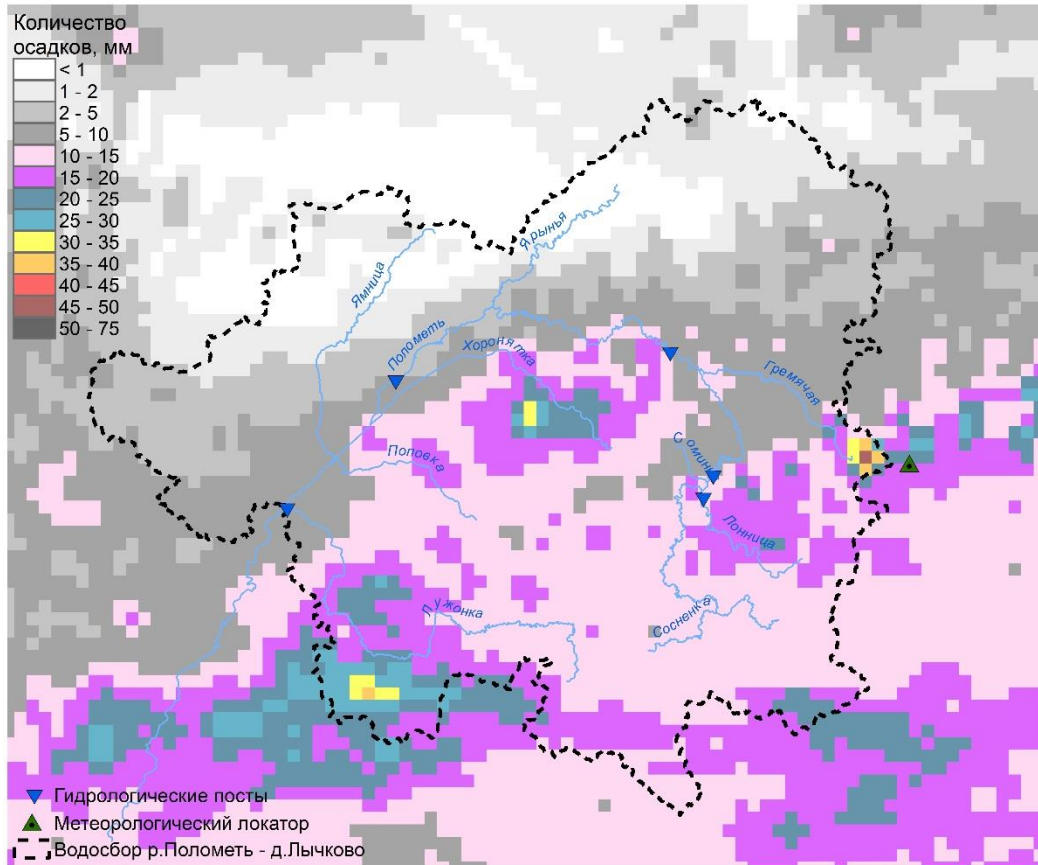


Рисунок 3.3 – Карта распределения количества осадков, выпавших 12 июня 2020 г.

В летний период осадки выпадают, в основном, в виде ливней. Наибольшие значения также наблюдаются в летние месяцы (июль–август), иногда в осенние (октябрь). Наибольшая суточная сумма осадков, измеренная по осадкомеру на метеоплощадке, составила 90,3 мм 9 августа 2019 г. В это же время pluviограф за ливень, который продолжался 23 часа 50 минут зафиксировал 100,3 мм осадков.

На формирование паводков в бассейне р. Полометь в первую очередь влияет количество, выпавших осадков, интенсивность и распределение их в течение паводочного периода. Так на малых водосборах дожди с количеством менее 10 мм за сутки вызывают заметное увеличение стока лишь в случае малых потерь на испарение с поверхности. В преобладающем большинстве случаев отдельные дожди с количеством осадком менее 10 мм не являются паводкообразующими. Дожди с количеством осадком более 10 мм вызывают заметное увеличением стока при значительной предпаводочной увлажненности почвогрунтов и высоких

уровней грунтовых вод. На формирование паводков особенно сильно сказываются засушливые периоды. Так засушливые периоды наблюдавшиеся после окончания снеготаяния, как правило, определяют величины дождевого стока ближайшего месяца, в отдельных случаях и всего летне-осеннего периода. После продолжительных засушливых периодов даже значительные дождливые периоды могут не вызывать паводки. В условиях весьма малых водосборов, крайне редко на формирование максимальных расходов дождевых паводков существенно сказывается поверхностный сток, образующийся при большой интенсивности выпадения осадков (более 2 мм/мин). Во время ливня 3 августа 2010 г. максимальная интенсивность осадков составила 4 мм/мин.

Изменчивость жидких осадков по результатам ДМРЛ-С «Валдай»

Одним из преимуществ метеорологических локаторов является их высокое как временное, так и пространственное разрешение, благодаря которому можно определить не только количество выпавших осадков на территории неосвещённой традиционной (наземной) метеорологической сетью, но и в целом оценить изменчивость жидких осадков на большой территории. Несмотря на то, что зона действия (диаметр) локатора составляет 500 км, использовать данные об атмосферных осадках можно только в радиусе 125 км по причине падения точности с увеличением расстояния от прибора.

На рисунках 3.4 – 3.5 представлены поля количества осадков за разные интервалы времени по данным ДМРЛ-С «Валдай» для разных лет. Оценка точности данных локатора описана в разделе 2.2.2.

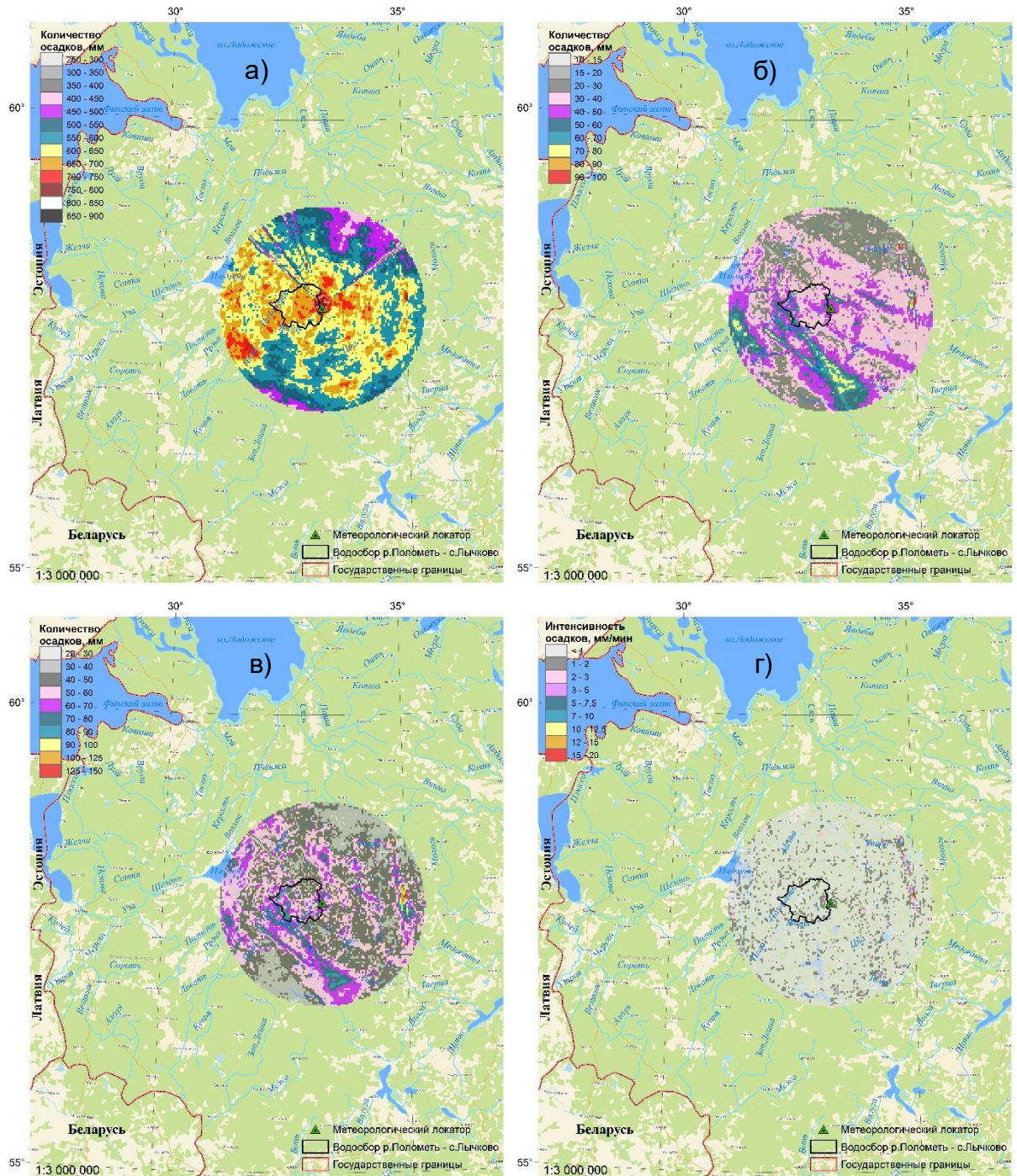


Рисунок 3.4 – Распределение количества а) сезонных осадков, б) максимальных суточных, в) 5–ти суточных и г) мгновенной интенсивности по данным ДМРЛ–С «Валдай» за 2017 г.

Так по данным ДМРЛ–С «Валдай» в 2017 г. выпало около 600 – 650 мм осадков, местами более 700 мм, наименьшее количество составило около 450 мм (рисунок 3.4а). Наиболее значительные суточные осадки наблюдались в конце мая – начале июня. Максимальное количество суточных осадков в основном варьировалось от 20 до 50 мм, на юге и юго-западе достигало 80 мм в сутки, в восточной части небольшими очагами выпадало и до 100 мм за сутки (рисунок 3.4б). Мгновенная интенсивность осадков (временное разрешение лоатора 10 мин) для

данной местности в основном не превышала 1 мм/мин (рисунок 3.4г), лишь местами превышала 3 мм/мин.

2020 г. был менее дождливым, однако, общая картина выпадения осадков выглядит более пространственно неоднородной (рисунок 3.5), в отличие от 2017 г.

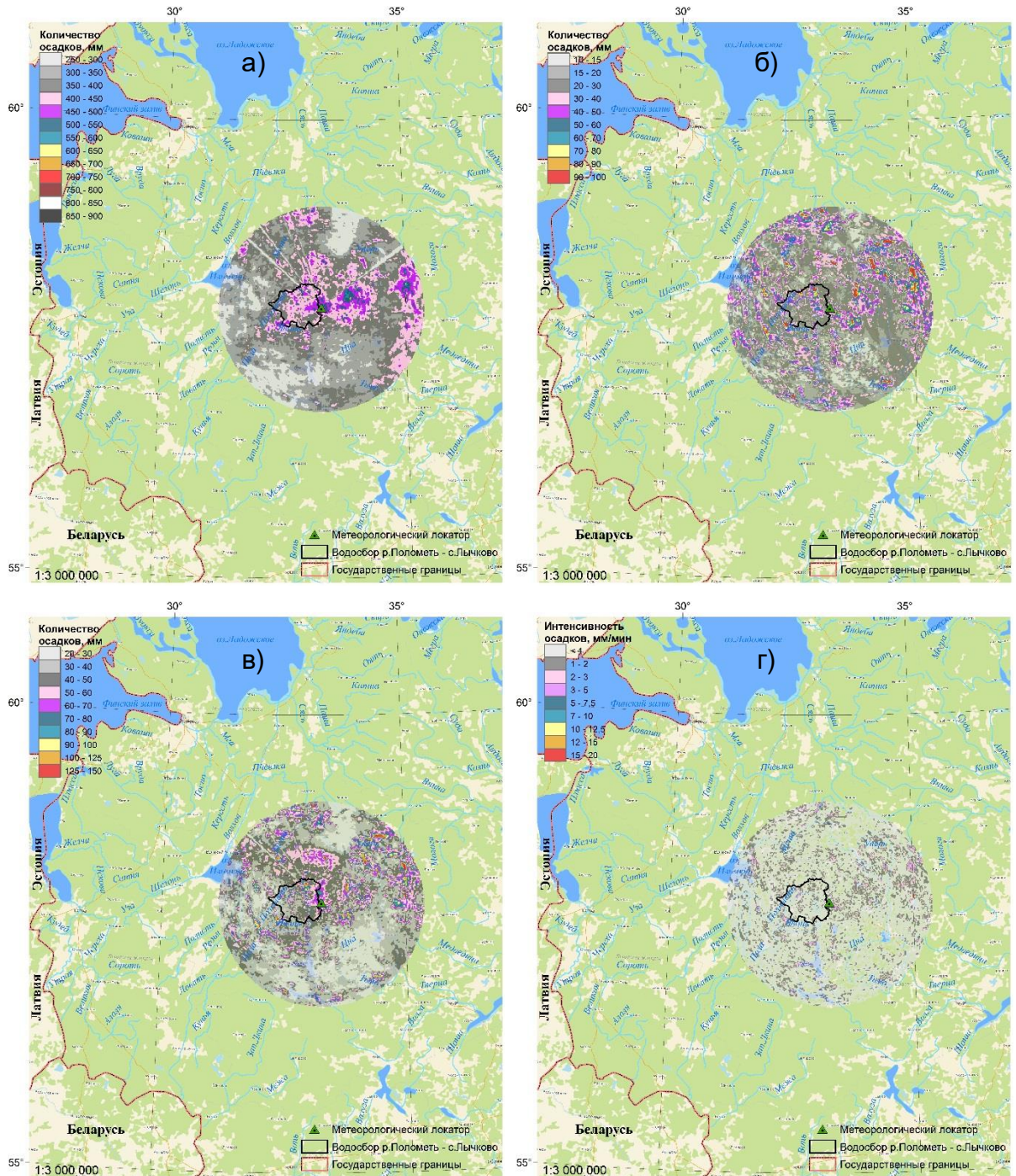


Рисунок 3.5 – Распределение количества а) сезонных осадков, б) максимальных суточных, в) 5-ти суточных и г) мгновенной интенсивности по данным ДМРЛ-С «Валдай» за 2020 г.

Среднее количество осадков за сезон составило около 400 – 450 мм, наибольшее количество 550 – 600 мм, местами менее 250 мм (рисунок 3.5а). Поле максимального количества осадков, выпавших за сутки отличалось высокой пространственной неоднородностью (от 15 до 60 мм) с образованием множества очагов с осадками более 70 мм (рисунок 3.5б). Что касается мгновенной интенсивности, то как и в 2017 г. для большей части она не превышала 1 мм/мин, однако, случаев выпадения осадков с интенсивностью более 3 и 5 мм/мин наблюдались чаще и практически повсеместно (рисунок 3.5г).

3.3 Исходные данные

Для работы модели был подготовлен ГИС–проект, включающий цифровую модель рельефа (ЦМР), сведения о почвенном и растительном покрове, а также о типе землепользования (рисунок 3.6).

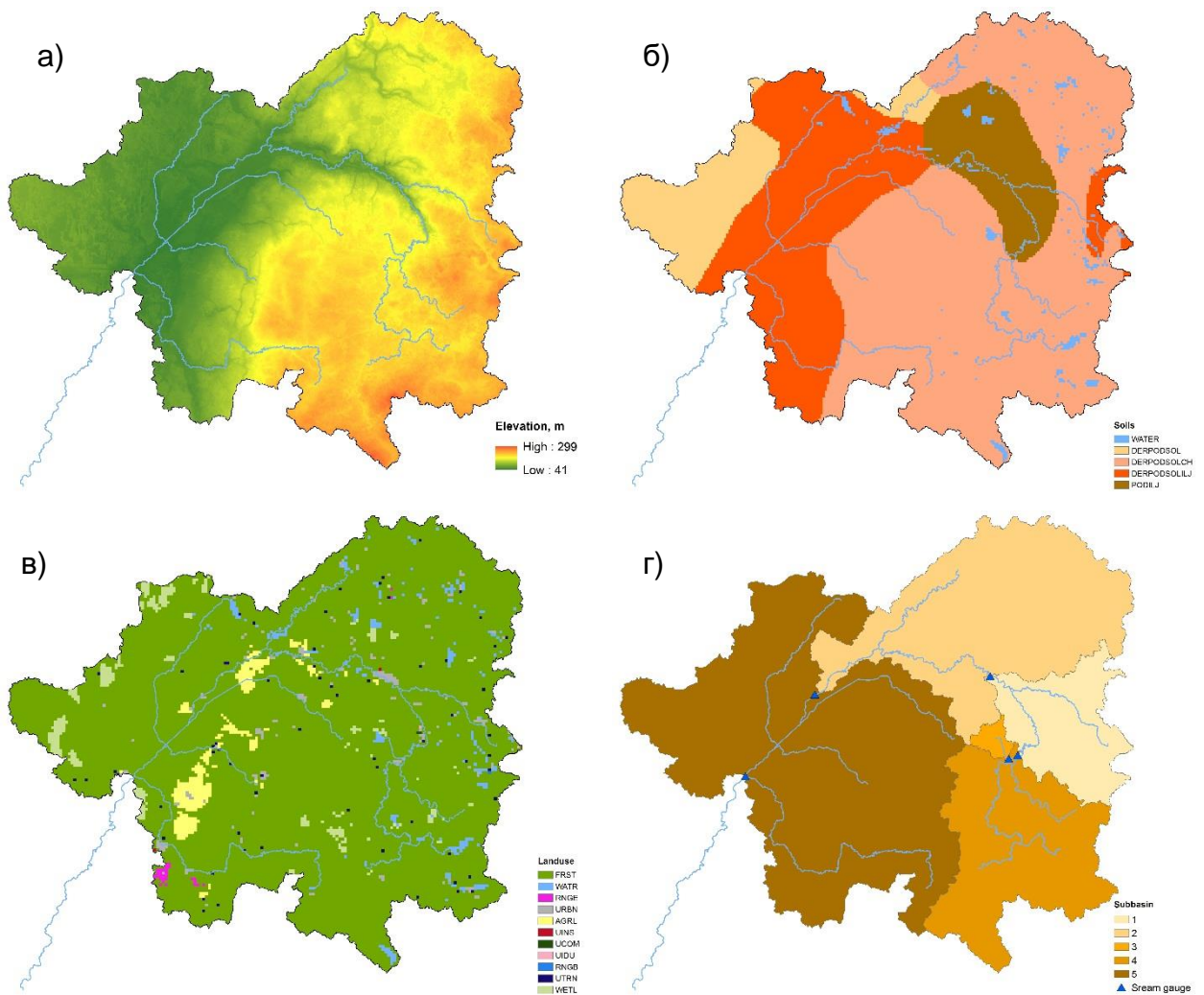


Рисунок 3.6 – Цифровая модель рельефа (а), растры почвенного (б), растительного (в) покрова и подбассейнов для гидрологических постов (г)

Разрешение ЦМР (рисунок 3.6а) составляет 30 x 30 м [MERIT DEM]. В качестве основы для почвенной карты (рисунок 3.6б) использовалась Электронная версия Национального атласа почв Российской Федерации [Национальный атлас почв Российской Федерации]. Информация гидрологических свойств почв сформирована из литературных источников трудов Государственного Гидрологического института [Капотов, Капотова, 1983; Капотов, Капотова, 1988] и Единого Государственного реестра почвенных ресурсов России [Единый Государственный Реестр Почвенных Ресурсов России] и включала следующие параметры: объемный вес, влажность завядания, наименьшая влагоемкость, коэффициент фильтрации (приложение А.1). Значения коэффициентов шероховатости приняты в соответствии с градацией, приведенной в технической документации модели SWAT (приложение А.2).

Значения большинства параметров, полученных в результате обобщения литературных источников, уточнялись в процессе калибровки модели.

Карта землепользования и растительного покрова (рисунок 3.6в) составлялась на основе открытого источника OpenStreetMap [OpenStreetMap Data Extracts]. Полученные типы растительного покрова и землепользования были изменены на соответствующие требованиям модели SWAT (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Типы растительного покрова и землепользования, соответствующие требованиям модели SWAT

Типы землепользования и растительного покрова OSM	Типы землепользования и растительного покрова, соответствующие требованиям модели SWAT
Forest (лес)	FRST (Forest-Mixed)
Quarry, lake (карьер, озеро)	WATR (WATER)
Meadow, heath (луга)	RNGE (Range-Grasses)
Allotments, military, town, village, residential (жилые зоны)	URBN (Residential)
Railways, roads (железнодорожные и автомобильные дороги)	UTRN (Transportation)
Farm (сельскохозяйственные земли)	AGRL (Agricultural Land-Generic)
Recreation ground, cemetery, park (игровые площадки, кладбища, парки)	UINS (Institutional)
Commercial (промышленные зоны)	UCOM (Commercial)
Industrial (промышленные зоны)	UIDU (Industrial)
Grass (газон)	RNGB (Range-Brush)
Wetland (болото)	WETL (Wetlands-Mixed)

Исходной информацией для проведения моделирования послужили материалы гидрометеорологических наблюдений Валдайского филиала ФГБУ «ГГИ» и метеорологических наблюдений сети Росгидромет Северо-Западного УГМС (таблица 3.1 – 3.2).

Метеорологические данные, включая среднесуточную скорость ветра (м/с), среднесуточную относительную влажность (%), суточную максимальную/минимальную температуру (°С) были получены с метеорологической станций Валдай. Суточное количество горизонтальной солнечной радиации (МДж/м²) получено из открытых источников [POWER Data Access Viewer].

В данном исследовании для моделирования использовались значения суточного и часового количества атмосферных осадков, полученные от наземных наблюдений (осадкомеры, пьювиограф) и оцененные по радиолокационным наблюдениям ДМРЛ-С «Валдай». (рисунок 3.7).

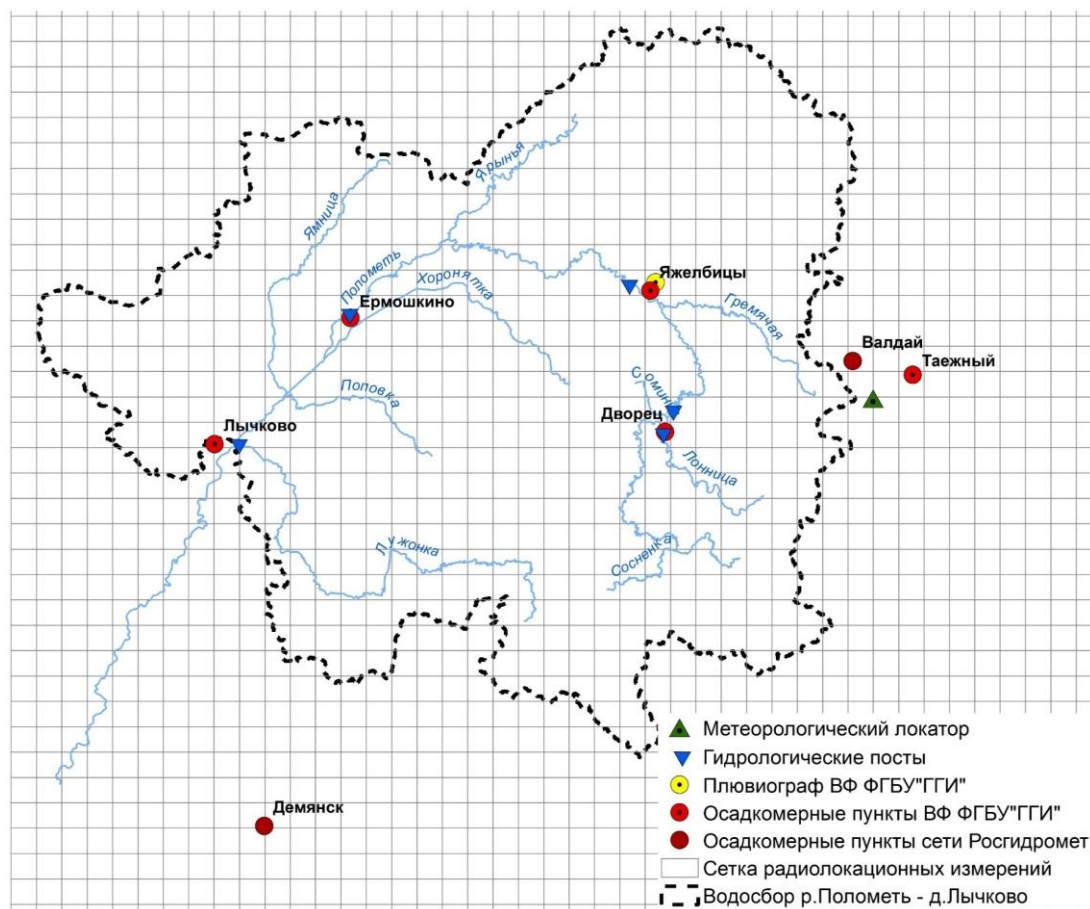


Рисунок 3.7 – Расположение пунктов наблюдений за атмосферными осадками

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 м 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 гидрологического режима рек бассейна р. Полометь с целью определения и уточнения параметров модели выполнено на основе данных об атмосферных осадках Валдайского филиала ФГБУ. 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.

3.4 Калибровка и верификация модели SWAT

Так как модель SWAT содержит большое число переменных параметров, задействованных в процессе моделирования, то на первом этапе было оценено их влияние на выходной результат. С помощью модуля SUFI-2 был проведен анализ чувствительности для 28 параметров, входящие в уравнения блоков поверхностных, почвенных и грунтовых вод, а также в уравнения образования и таяния снежного покрова (таблица 3.4).

Таблица 3.4 - Параметры модели SWAT, участвующие в анализе чувствительности

№	SWAT параметр	Название	Описание	Диапазон		Исходные данные / Метод расчета параметров
				min	max	
1	Basin	Surlag	Коэффициент запаздывания поверхностного стока (б/р)	0,05	24	значение по умолчанию
2	Basin, snow	Timp	Коэффициент запаздывания температуры снежного покрова (б/р)	0	1	калибровка
3	Basin, snow	Sfmfn	Минимальная скорость таяния снега в течение года (зимой) (мм/°С–день)	0	20	калибровка
4	Basin, snow	Sfmfx	Максимальная скорость таяния снега в течение года (летом) (мм/°С–день)	0	10	калибровка
5	Basin, snow	Sftmp	Температура воздуха, при которой выпадает снег (°С)	-20	20	калибровка
6	Basin, snow	Smtmp	Температура воздуха, при которой начинается таяние снега (°С)	-20	20	калибровка
7	Basin, snow	Sno50cov	Водный эквивалент снега, соответствующий 50% снежному покрову (б/р)	0	1	калибровка
8	Basin, snow	Snocovmx	Минимальный влагозапас в снеге, соответствующий 10% снежного покрова	0	500	калибровка
9	Subbasin	CH_N1	Коэффициент шероховатости русел притоков (б/р)	0,01	30	справочный материал
10	HRU	CN2	Номер кривой расхода при нормальном увлажнении (б/р)	35	98	калибровка
11	HRU	Lat_Ttime	Время прохождения почвенного стока (сутки)	0	180	калибровка
12	HRU	OV_N	Коэффициент шероховатости склонов (б/р)	0,01	30	справочный материал
13	HRU	Esco	Параметр компенсации испарения из почвы (б/р)	0	1	калибровка
14	HRU	Canmx	Максимальный слой воды в емкостях перехвата осадков (мм)	0	100	калибровка
15	HRU	Epcr	Параметр компенсации транспирации растениями (б/р)	0	1	значение по умолчанию
16	Groundwater	Alpha_Bf	Коэффициент истощения грунтовых вод (1/день)	0	1	по формуле
17	Groundwater	Gw_Delay	Время инфильтрации (дни)	0	500	калибровка
18	Groundwater	Rchrg_Dp	Доля грунтовых вод, питающих глубокие подземные горизонты (б/р)	0	1	калибровка
19	Groundwater	Revapmn	Пороговый уровень грунтовых вод, при котором возникает капиллярное поднятие (мм)	0	500	калибровка
20	Groundwater	Gwqmn	Пороговый уровень грунтовых вод, при котором возникает сток (мм)	0	5000	калибровка
21	Groundwater	Gw_Revap	Коэффициент капиллярного поднятия из грунтовых вод (б/р)	0,02	0,2	калибровка
22	Groundwater	Shallst	Начальный уровень воды в верхнем ярусе грунтовых вод (мм)	0	50000	значение по умолчанию
23	Groundwater	Deepst	Начальный уровень воды в глубоком ярусе подземных вод (мм)	0	50000	значение по умолчанию
24	Soil	Sol_Awc	Доступная влагоемкость почвенного слоя (мм воды/мм почвы)	0	1	справочный материал
25	Soil	Sol_K	Водопроницаемость насыщенного слоя (мм/ч)	0	2000	справочный материал
26	Soil	Sol_Bd	Удельный вес при полевой влагоемкости (мг/м ³ или г/см ³)	0,9	2,5	справочный материал
27	Plant	Evlai	Индекс площади листа, при котором не происходит испарения с поверхности воды (б/р)	0	10	значение по умолчанию
28	Routing	CH_N2	Коэффициент шероховатости главного русла (б/р)	-0,01	0,3	справочный материал

В результате анализа чувствительности выделено 17 параметров (таблица 3.5), оказывающих наибольшее влияние на результаты моделирования речного стока на исследуемом водосборе. К наиболее значимым параметрам, к которым чувствительна модель, относятся Lat_Time, Sftmp и Smtmp. Параметры Surlag, Evlai и Erco оказались наименее важными, изменение их величин не влияет на выходной результат. 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 Sftmp, Smtmp – температура воздуха, при которой осадки выпадают в виде снега и начинается снеготаяние, затем параметры, относящиеся к HRU (CN2, Canmx – номер кривой расхода при нормальном увлажнении, максимальный слой воды в емкостях перехвата осадков).

Таблица 3.5 – Значения параметров модели SWAT принятых для гидрологических постов по результатам калибровки

Параметр SWAT	р. Лонница - д. Мосолино	р. Полометь - д. Дворец	р. Полометь - с. Яжелбицы	р. Полометь - д. Ермошкино	р. Полометь - с. Лычково
SFTMP	-0,867	-0,867	-0,867	-0,867	-1,83
SMTMP	2,676	2,676	2,676	2,676	1,096
SMFMX	3,047	3,047	3,047	3,047	3,047
SMFMN	0,477	0,477	0,477	0,477	0,477
TIMP	0,886	0,886	0,886	0,886	0,288
Canmx	0	10	15	10	10
ESCO	0,85	0,8	0,8	0,7	0,7
SNO	120	120	120	120	120
SNO0.5	0,15	0,15	0,2	0,15	0,2
CN2	35	35	40	40	40
Rchrg_Dp	0,5	0,23	0,25	0,17	0,4
Alpha_Bf	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Gwqmn	100	100	500	100	100
GW_delay	20	15	50	50	25
REVPAN	500	500	500	600	500
GW_revap	0,05	0,05	0,05	0,05	0,19
Lat_Time	0	0	2	0	2

Основным показателем для оценки качества моделирования в пределах каждого расчетного года выбран критерий качества Нэша–Сатклиффа (*NSE*). Данный критерий является часто используемой метрикой, отчасти потому, что она нормализует производительность модели в интерпретируемую шкалу. *NSE* равное 1 указывает на идеальное соответствие между рассчитанными и наблюдаемыми величинами, *NSE* равное 0 указывает на то, что модель показывает те же результаты, что и среднее значение временного ряда, $NSE < 0$ указывает, что

модель является худшим предсказателем, чем среднее значение наблюдений [Schaefli, Gupta, 2007].

В качестве дополнительных критериев для оценки эффективности модели использованы коэффициент Клинг–Гупта (KGE) и относительная погрешность средних годовых расходов воды (%).

Как и NSE , $KGE = 1$ указывает на полное соответствие между рассчитанным и наблюдаемым. Что касается границ аналогичных NSE существуют различные оценки относительно категорирования результатов моделирования. Так некоторые авторы утверждают, что $KGE < 0$ указывает на то, что среднее значение наблюдений дает лучшие оценки, чем моделирование [Castaneda-Gonzalez et al., 2018; Koskinen et al., 2017]. Различные авторы используют положительные значения KGE как показатель “хорошего” моделирования, в то время как отрицательные значения KGE считаются “плохими”, явно не указывая, что они рассматривают KGE равное 0 как пороговое значение между “хорошей” и “плохой” производительностью. В то же время некоторые авторы доказывают, что отрицательные значения KGE не обязательно указывают на то, что модель работает хуже, чем значение среднего расхода [Knoben, 2019]. Следует подчеркнуть, что значения NSE и KGE напрямую не сопоставимы и их следует рассматривать, как два разных критерия, характеризующие качество моделирования.

Границы интервалов оценки критерия качества Нэша–Сатклиффа представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Границы интервалов оценки критерия качества Нэша–Сатклиффа

Оценка сходимости	NSE
Очень хорошая	$0,75 < NSE \leq 1$
Хорошая	$0,65 < NSE \leq 0,75$
Удовлетворительная	$0,5 < NSE \leq 0,65$
Неудовлетворительная	$NSE < 0,5$

Использование коэффициента Нэша–Сатклифа имеет недостаток. При малых значениях моделируемой величины коэффициент NSE занижает качество моделирования, а при высоких значениях переоценивает [Hwang et al., 2012].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}, \quad (3.2)$$

Коэффициент KGE :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{P}}{\bar{Q}}\right)^2}, \quad (3.3)$$

Относительная погрешность рассчитывается по формуле:

$$\delta = \frac{(\bar{P} - \bar{Q})}{\bar{Q}} * 100\%, \quad (3.4)$$

где Q_i – наблюдаемый расход воды за i -й интервал времени; P_i – рассчитанный расход воды за i -й интервал времени; r – коэффициент корреляции; σ_{sim} – стандартное отклонение рассчитанного ряда расходы воды; σ_{obs} – стандартное отклонение наблюдаемого ряда расходы воды; \bar{Q} – осредненный за весь период моделирования наблюдаемый расход воды; \bar{P} – осредненный за весь период моделирования рассчитанный расход воды, n – длина ряда в годах.

Результаты моделирования стока для бассейна р. Полометь можно считать хорошими, так как среднее значение критерия NSE по всем постам составило 0,66. (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Значения критериев за периоды калибровки, верификации и всего расчетного периода для постов бассейна р. Полометь

Критерий	Период	р.Лонница - д.Мосолино	р.Полометь - д.Дворец	р.Полометь - с.Яжелбицы	р.Полометь - д.Ермошкино	р.Полометь - с.Лычково
NSE	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
KGE	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	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

На рисунках 3.8 – 3.12 представлены рассчитанные и наблюдаемые гидрографы р. Полометь для лет с дождевыми паводками в летне–осенний сезон с различной сходимостью для периода калибровки и верификации.

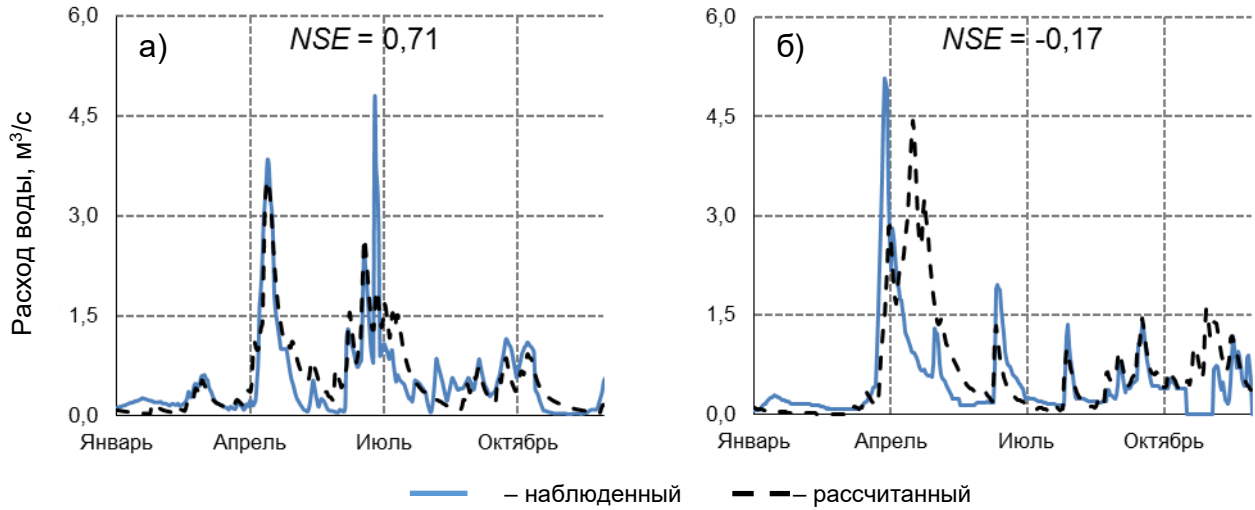


Рисунок 3.8 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. Лонница – д. Мосолино за а) 1998 и б) 2011 гг.

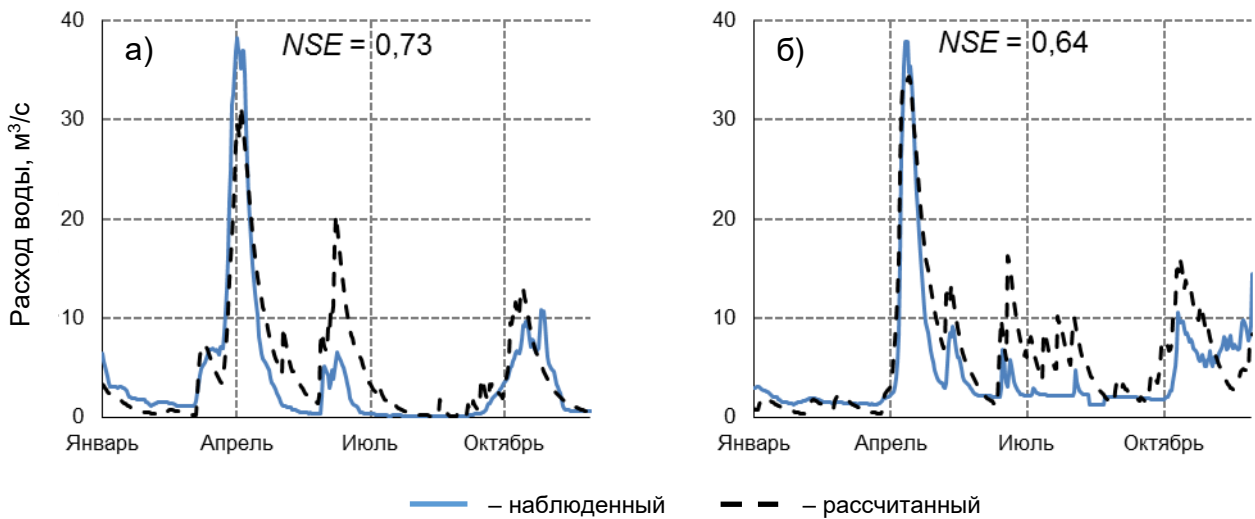


Рисунок 3.9 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. Полометь – д. Дворец за а) 2001 и б) 2013 гг.

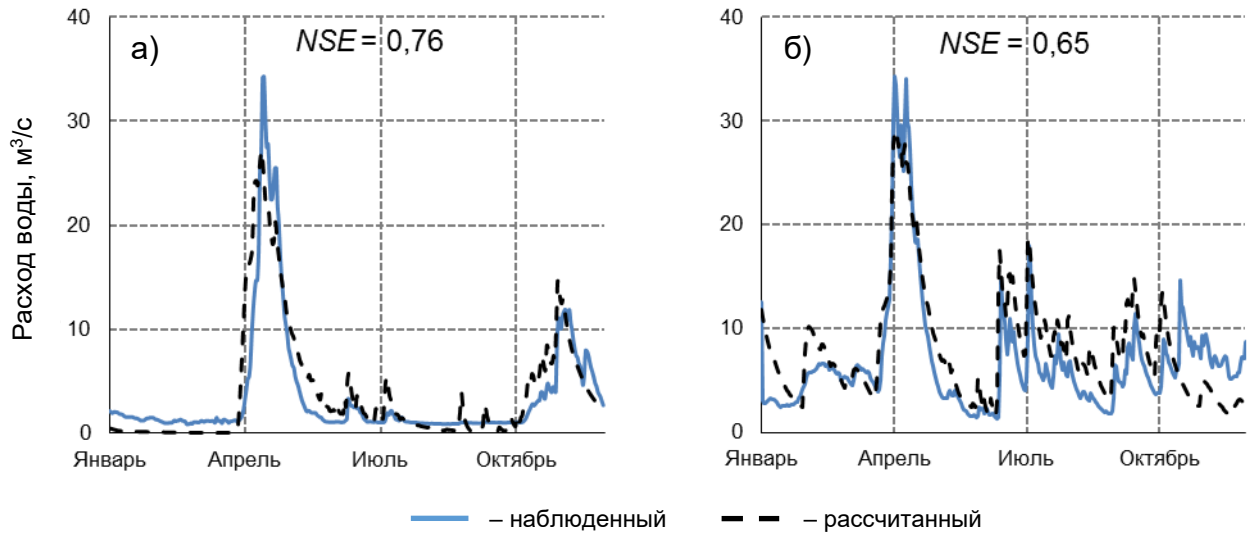


Рисунок 3.10 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. ПолOMETь – с. Яжелбицы за а) 1996 и б) 2016 гг.

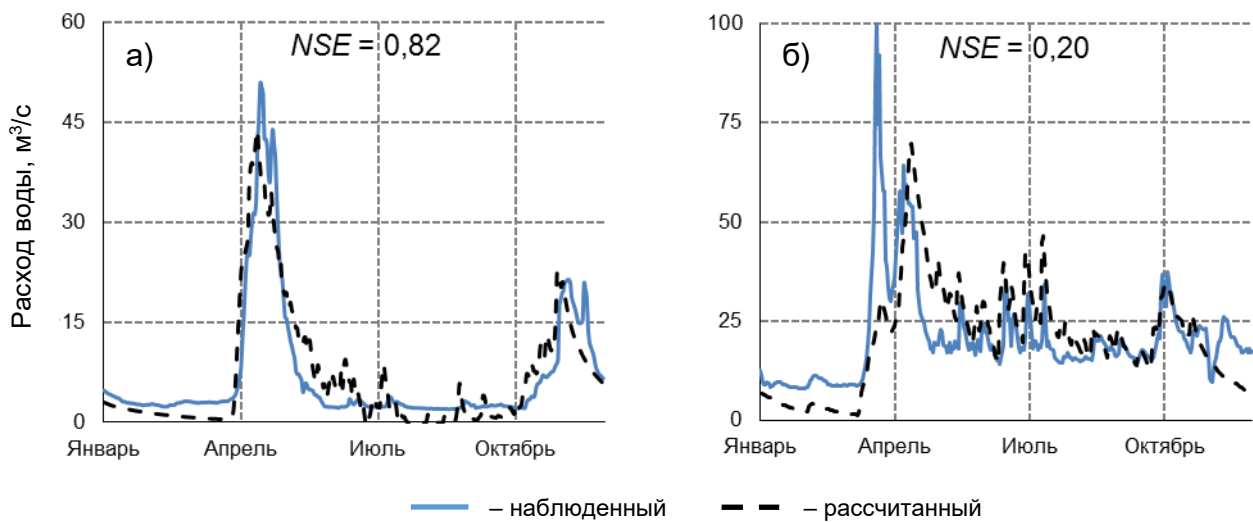


Рисунок 3.11 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. ПолOMETь – д. Ермошкино за а) 1996 и б) 2004 гг.

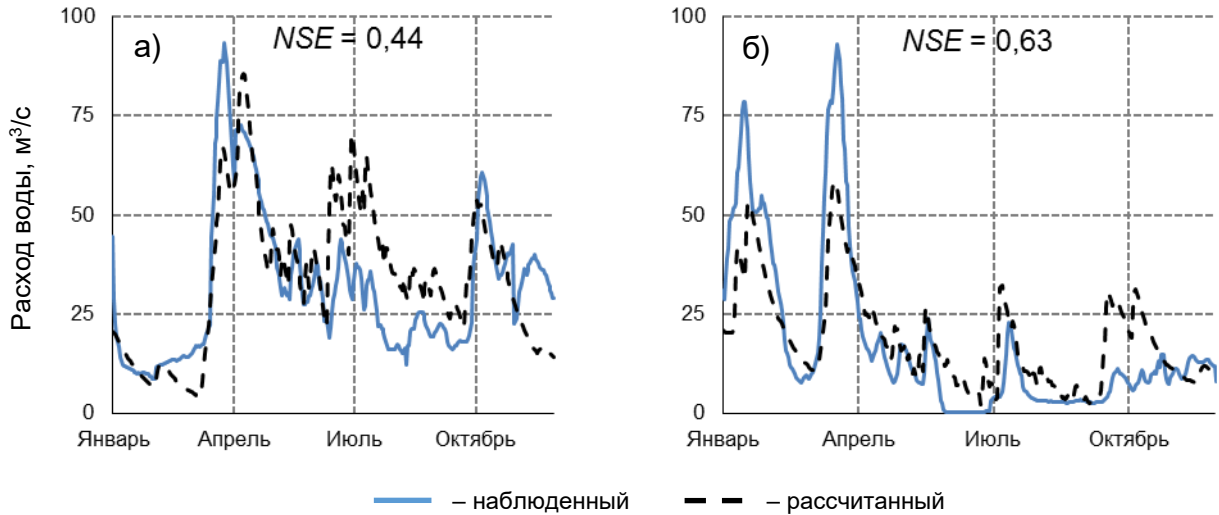


Рисунок 3.12 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока р. ПолOMETь – с. Лычково за а) 2004 и б) 2007 гг.

Графические результаты моделирования 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.

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

3.5 Влияние входных данных на результаты моделирования

3.5.1 Сценарии входных данных об осадках

Оценка влияния данных об атмосферных 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 осадков за период с мая по октябрь 2020 г. (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Сценарии входных данных об осадках

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

Для всех сценариев использовались параметры откалиброванной модели (раздел 3.4), 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 (рисунок 3.13), 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. Переход от отражаемости к осадкам и полученные зависимости описаны в разделе 2.2.2. 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.

Расчет значений невязки для сценариев № 4, 7 производился на основе данных тех постов, которые участвовали в калибровке метеорологического локатора (раздел 2.2.2).

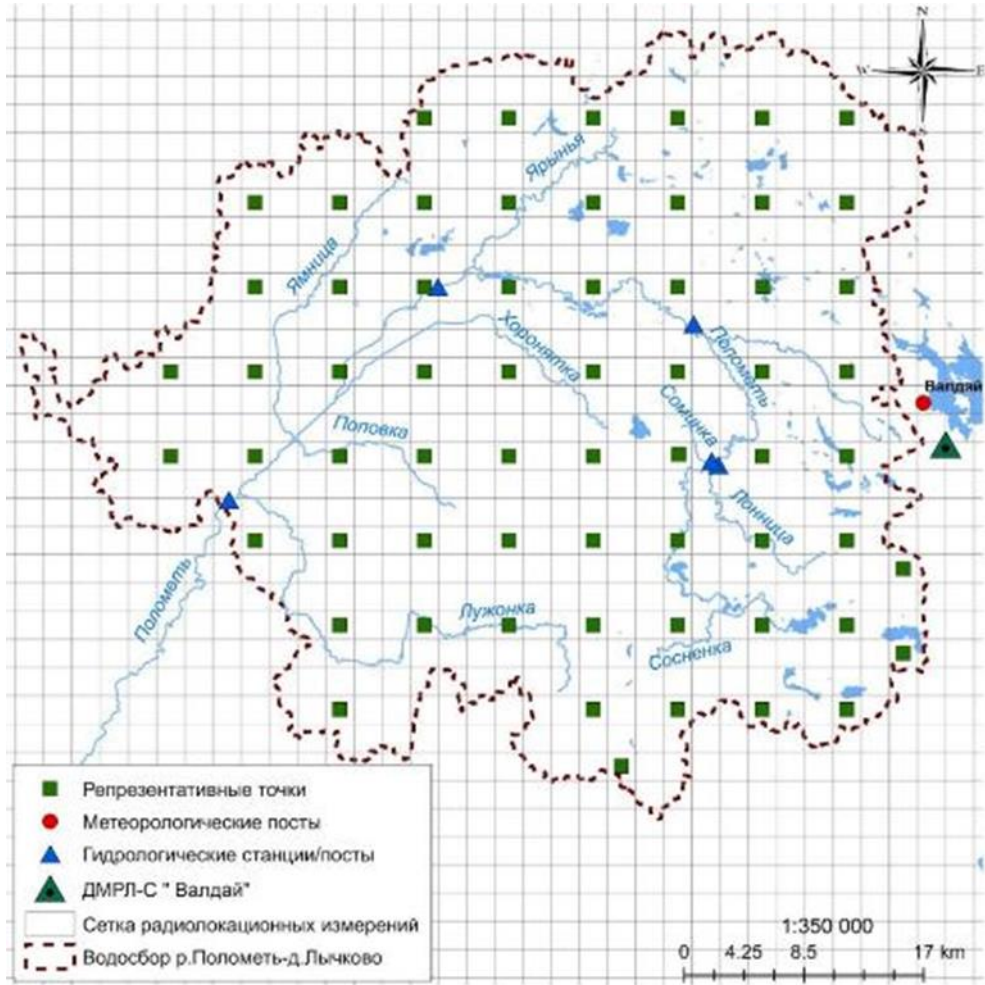


Рисунок 3.13 – Схема водосбора р. Поломелъ с сеткой радиолокационных измерений

Для оценки качества моделирования критерии эффективности рассчитывались в пределах теплого времени года с мая по октябрь по среднесуточным расходам воды, когда сценарные данные вводились в модель. Среднесуточные расходы воды для сценариев № 5 – 7, 9 вычислялись как среднее арифметическое взвешенное по времени значение, полученное из часовых значений расходов воды по формуле:

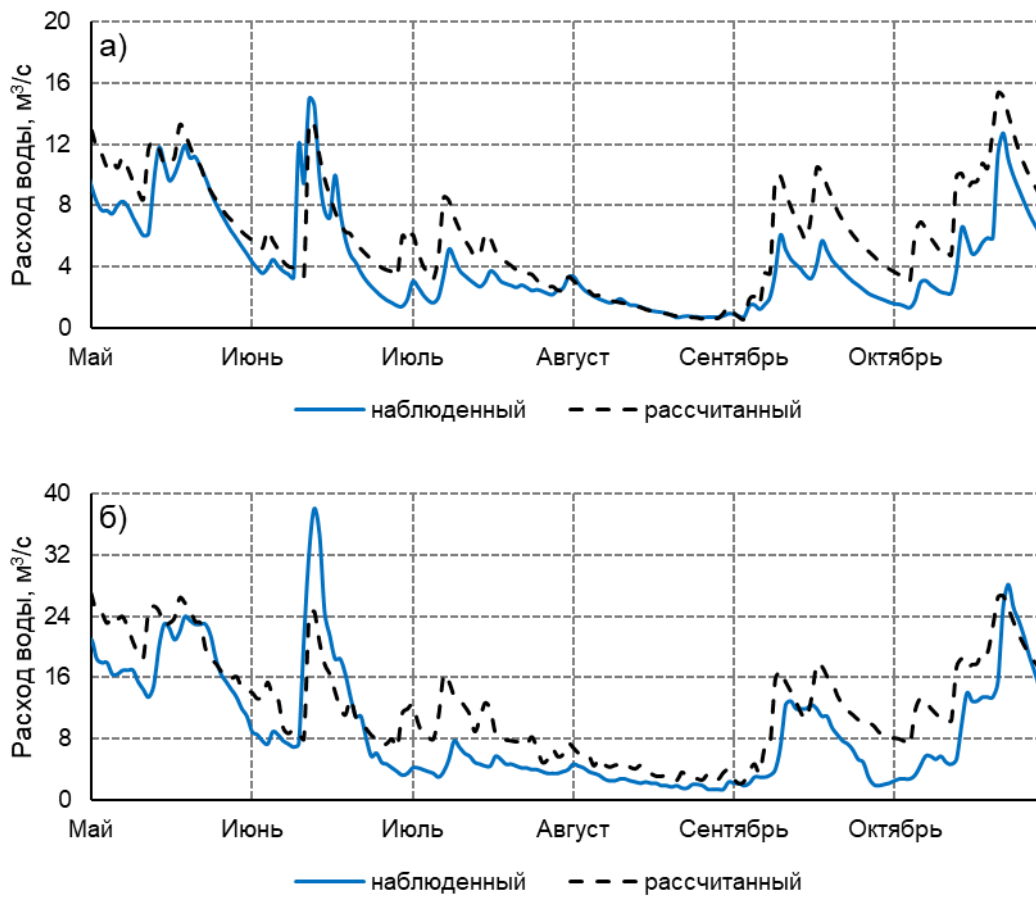
$$Q_{\text{сут}} = \frac{\left[\frac{(Q_1 + Q_2) * (T_2 - T_1)}{2} + \frac{(Q_2 + Q_3) * (T_3 - T_2)}{2} + \dots + \frac{(Q_{n-1} + Q_n) * (T_n - T_{n-1})}{2} \right]}{(T_n - T_1)}, \quad (3.5)$$

где T_1, T_2, \dots, T_n – сроки, для которых вычислены часовые расходы воды, следующие в течение суток в хронологически возрастающем порядке; Q_1, Q_2, \dots, Q_n – значения расхода воды в сроки $T_1, T_2, \dots, T_n, \text{ м}^3/\text{с}$.

3.5.2 Результаты моделирования

Сценарий №1

Сценарий №1 основан на данных государственной наблюдательной сети Росгидромета, обе метеорологические станции находятся за пределами водосборной площади р. Полометь. Соответствие гидрографов, рассчитанных по сценарию № 1 для постов с. Яжелбицы ($NSE = 0,76$, $KGE = 0,57$) и д. Ермошкино ($NSE = 0,82$, $KGE = 0,63$) можно признать очень хорошим и в целом, рассчитанные гидрографы повторяют ход фактических гидрографов, особенно период летней межени в августе (рисунок 3.14а - 3.14б).



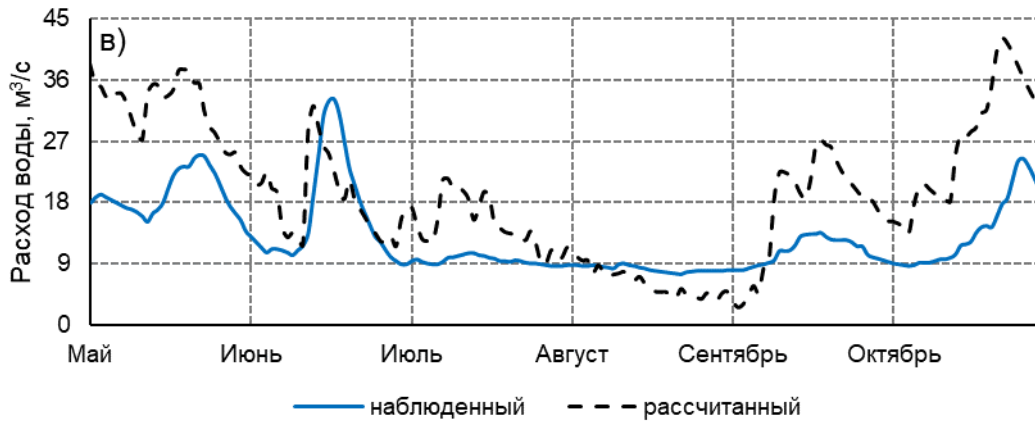


Рисунок 3.14 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока а) р. Полометь – с. Яжелбицы, б) р. Полометь – д. Ермошкино, в) р. Полометь – с. Лычково за 2020 г. по сценарию № 1

Относительная погрешность среднего расхода за расчетный период для всех постов составляет почти 40 % за счет завышения почти в 2 раза рассчитанных по модели расходов воды осенних паводков (сентябрь–октябрь), а также расходов серии дождевых паводков, прошедшие в июле. Эти случаи, возможно, обусловлены завышением слоев осадков вследствие нерепрезентативности метеоданных для водосбора р. Полометь в летний период. Так, к примеру, метеостанция Валдай расположена в приводораздельной зоне на берегу озера Валдай, которая характеризуется обильными и интенсивными летними осадками, но и в целом большими как годовыми, так и сезонными осадками.

Сценарий №2

Несмотря на относительно плотную осадкомерную сеть, результаты расчета по сценарию № 2 считаются удовлетворительными (среднее значение для постов $NSE = 0,57$, $KGE = 0,30$). В отличие от сценария № 1, осадкомеры, расположены в пределах исследуемого водосбора и в различных его частях. В целом, можно сказать, что рассчитанный гидрограф хорошо описывает летне–осенний период, однако, паводок с пиком 18 июня, отсутствующий на фактическом гидрографе (рисунок 3.15), является причиной низких значений критериев NSE и KGE , а также высокой относительной погрешности ($\delta > 60\%$).

Одним из источников данного расхождения являются локальные осадки суточная сумма, которых составила 44,7 мм, зафиксированные 17 июня только на осадкомерном пункте Дворец, по–видимому, охватили очень небольшую площадь и не дали такого объема паводка, который был рассчитан моделью. Стоит отметить, что максимальная температура воздуха, наблюдавшаяся на метеостанции Валдай в то время несколько дней превышала 31 °С, что могло быть причиной значительных потерь на испарение. Такие вероятные причины как ошибка или опечатка в данных измерений, в работе не рассматривались.

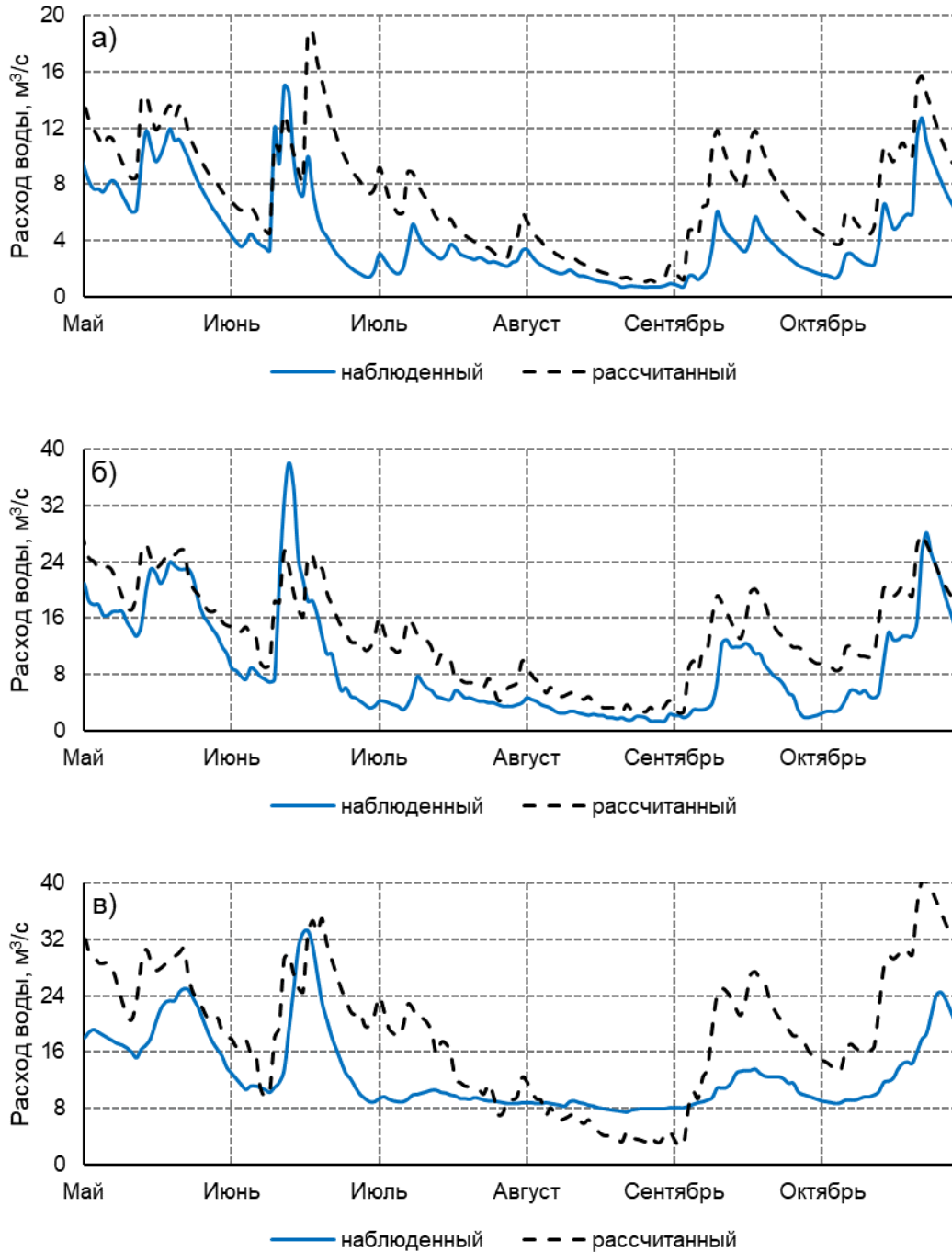


Рисунок 3.15 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока а) р. Полометь – с. Яжелбицы, б) р. Полометь – д. Ермошкино, в) р. Полометь – с. Лычково за 2020 г. по сценарию № 2

Сценарий №3

В результате расчета по сценарию № 3 среднее значение критериев соответствия наблюдаемого и рассчитанного гидрографа стока NSE и KGE повысились до 0,78 и 0,51, соответственно, а относительная погрешность среднего расхода за расчетный период не превышает 21 % (рисунок 3.16).

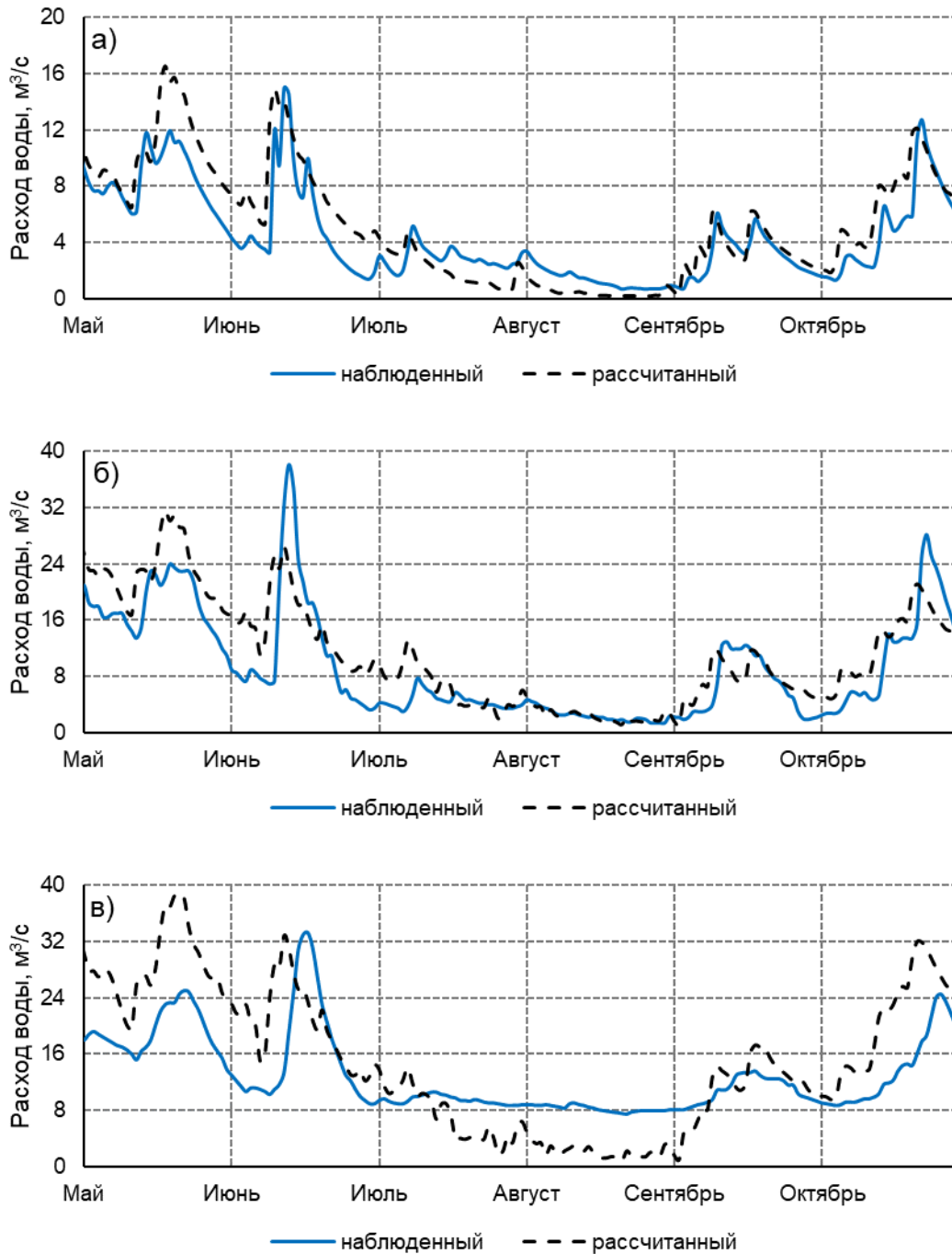


Рисунок 3.16 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока а) р. Полометь – с. Яжелбицы, б) р. Полометь – д. Ермошкино, в) р. Полометь – с. Лычково за 2020 г. по сценарию № 3

Несоответствие наблюдается в мае, где объем паводка несколько завышен, что, возможно, повлияло на несовпадение дат пика июньского паводка. Расходы воды за период июль – август занижены по отношению к фактическим, за исключением поста с. Лычково, что скорее всего объясняется недооценкой количества выпавших осадков, полученные радиолокационным методом.

Сценарий №4

Результат моделирования по сценарию № 4 также можно назвать хорошим (критерии *NSE* и *KGE* составили 0,71 и 0,50, соответственно), однако, значение δ по данному сценарию достаточно высокое (33,1 %), из-за разницы, рассчитанного и наблюдаемого объёма осенних паводков в сентябре и октябре (рисунке 3.17).

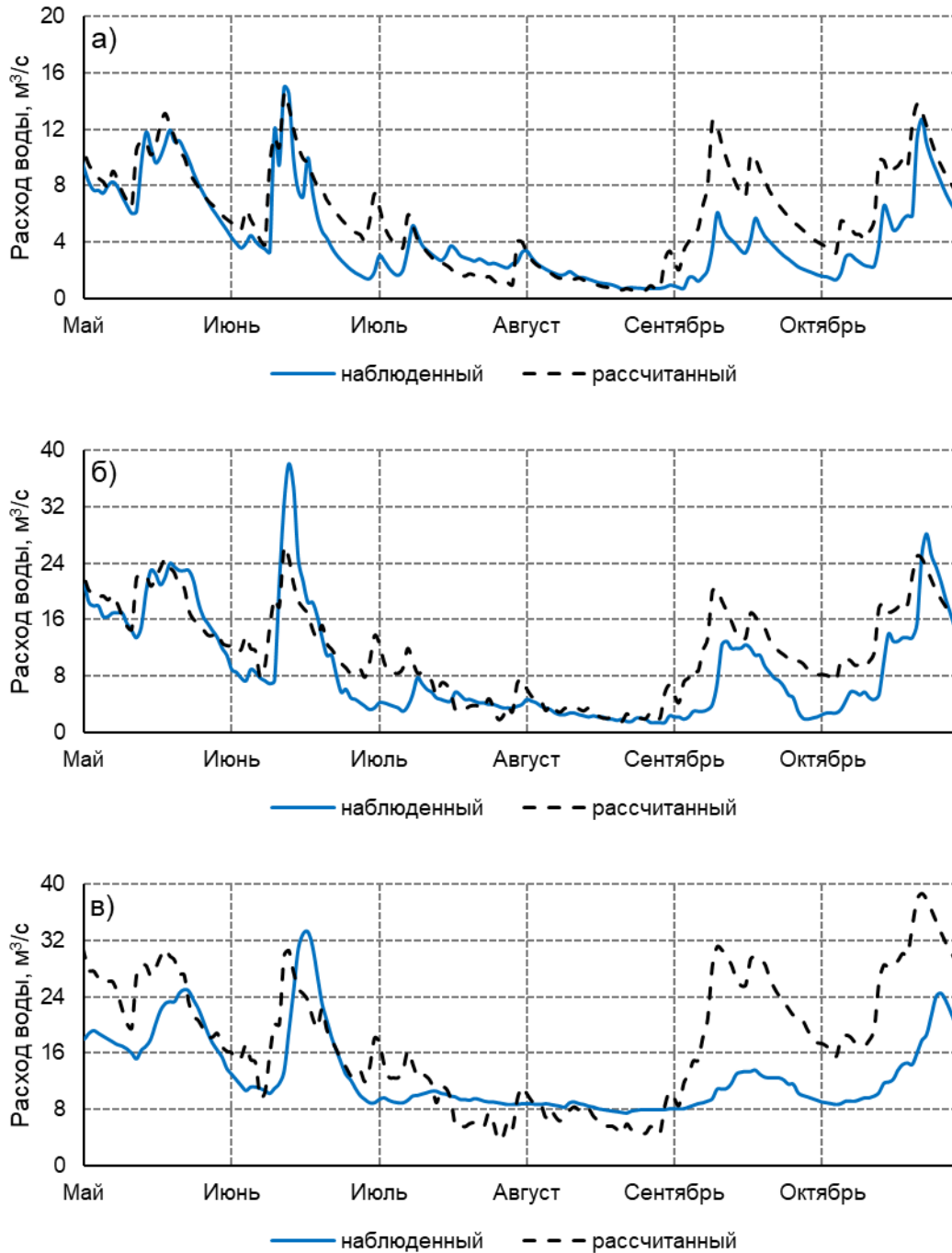
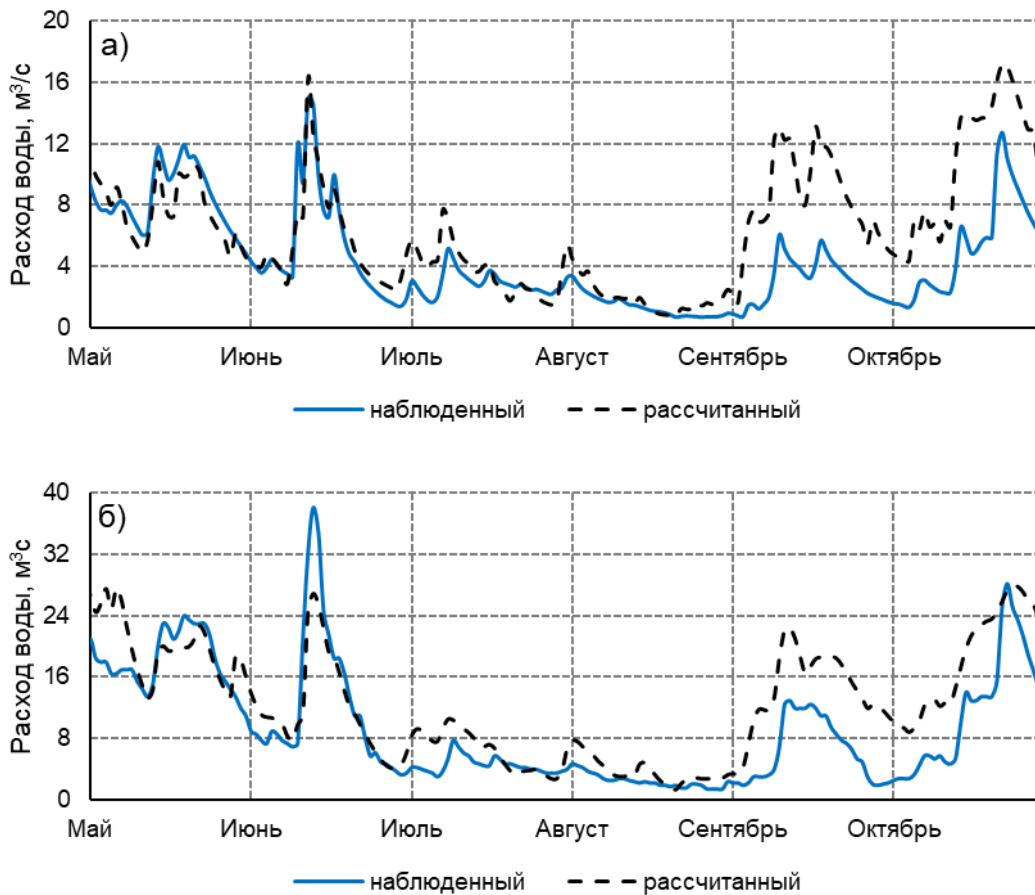


Рисунок 3.17 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока а) р. Полометь – с. Яжелбицы, б) р. Полометь – д. Ермошкино, в) р. Полометь – с. Лычково за 2020 г. по сценарию № 4

Источником такой ошибки может быть выбор метеорологических постов для процедуры расчета невязки, где важное значение имеет их расположение, так как значения количества атмосферных осадков, принимаемые за истинные, могут не соответствовать реальной картине выпадения осадков на исследуемой территории. В тоже время, моделирование на основе комбинирования радиолокационных и наземных данных несколько улучшило сходимость рассчитанного и наблюдаемого гидрографов за летний период, по сравнению с предыдущими сценариями. Так объем, амплитуда и даты наступления максимальных расходов рассчитанных дождевых паводков за период с мая по июнь почти соответствуют фактическим, за исключением ветви спада паводка в июне.

Сценарий №5

Рассчитанный гидрограф по сценарию № 5 в целом показывает хорошую сходимость за летние месяцы, совпадение по дате наступления пиковых расходов и ветви подъема и спада паводка в июне, а также хорошее соответствие меженных расходов в августе, но начиная с сентября рассчитанные расходы воды почти в 2 раза превышают наблюдаемые (рисунок 3.18).



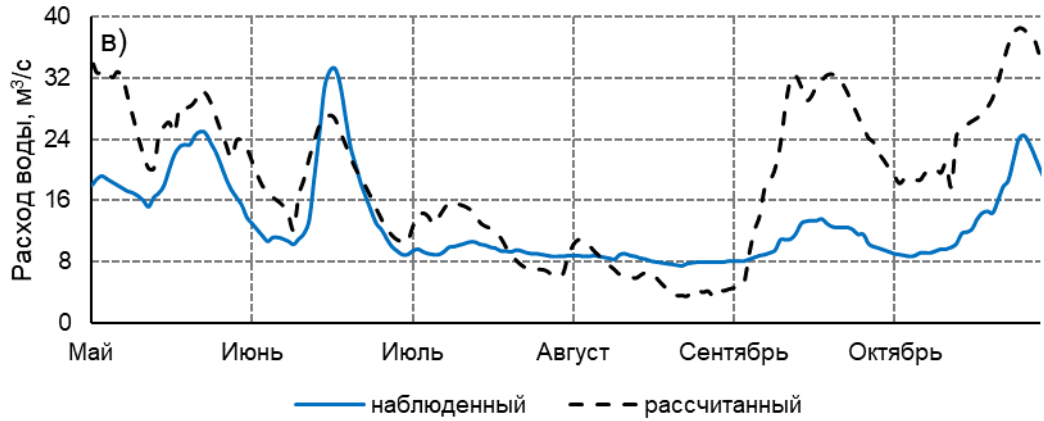
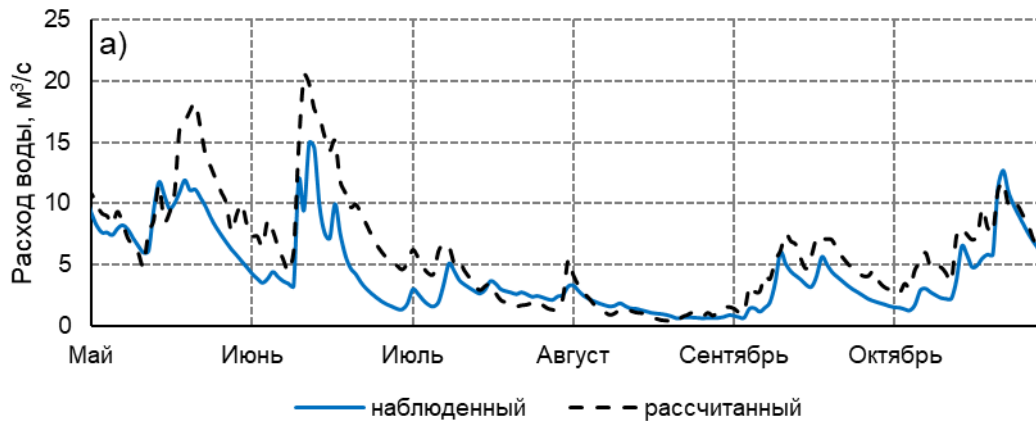


Рисунок 3.18 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока а) р. Полометь – с. Яжелбицы, б) р. Полометь – д. Ермошкино, в) р. Полометь – с. Лычково за 2020 г. по сценарию № 5

Критерии NSE , KGE и δ по данному сценарию составили 0,60, 0,38 и 40,3 %, что соответствует удовлетворительному качеству моделирования.

Сценарий №6

Результаты соответствия гидрографов по сценарию № 6 можно признать хорошими ($NSE = 0,71$, $KGE = 0,40$), однако, объем паводков в мае и июне не соответствует наблюдаемому, за счет чего относительная погрешность составляет почти 38 % (рисунок 3.19).



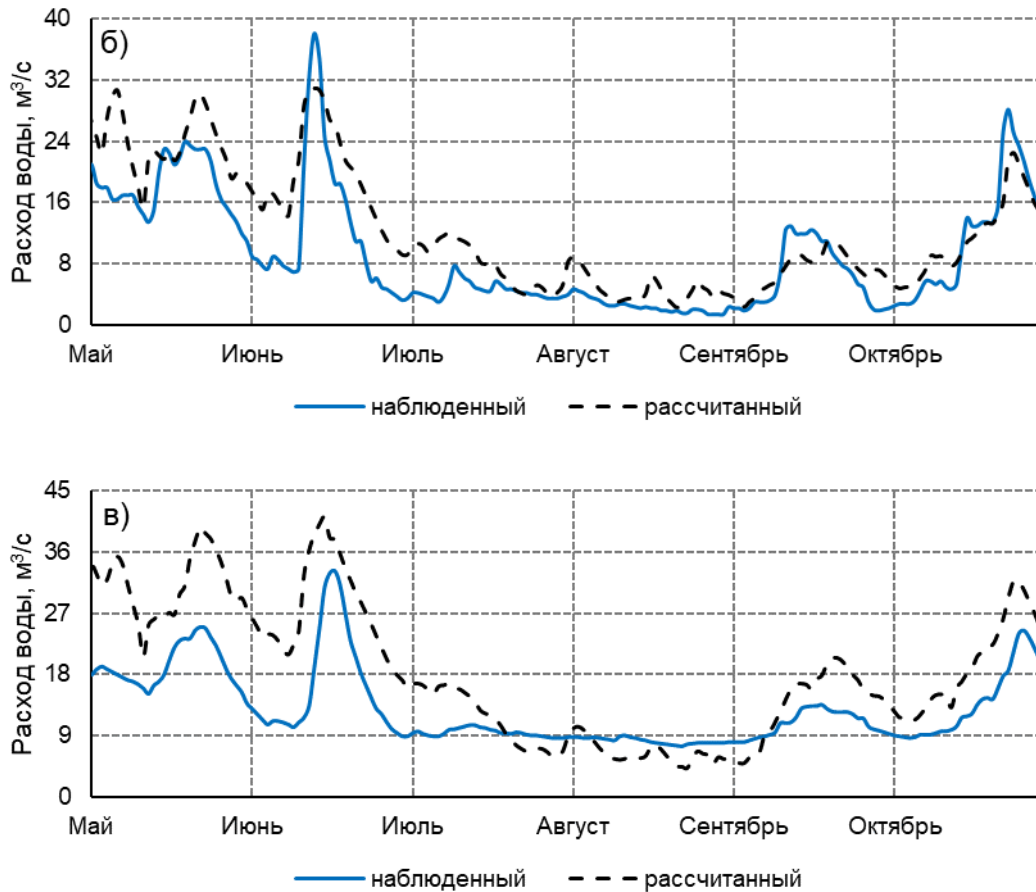


Рисунок 3.19 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока а) р. Полометь – с. Яжелбицы, б) р. Полометь – д. Ермошкино, в) р. Полометь – с. Лычково за 2020 г. по сценарию № 6

Стоит отметить, что в основе сценария № 3 лежат часовые данные радиолокационных измерений, калибровка которых, выполнялась с использованием только одного pluviографа без учета пространственной изменчивости параметров A и b в ZR -отношении.

Сценарий №7

Результаты расчета на основе данных сценария № 7 показывают низкие значения всех критериев, значения NSE , KGE и δ составили 0,42, 0,23 и 64 %, соответственно. В отличие от сценария № 4, невязка для корректировки часовых радиолокационных данных рассчитывалась только по данным одного pluviографа и принималась единой для всех репрезентативных точек соответствующего срока наблюдения и не учитывает их пространственной изменчивости (рисунок 3.20).

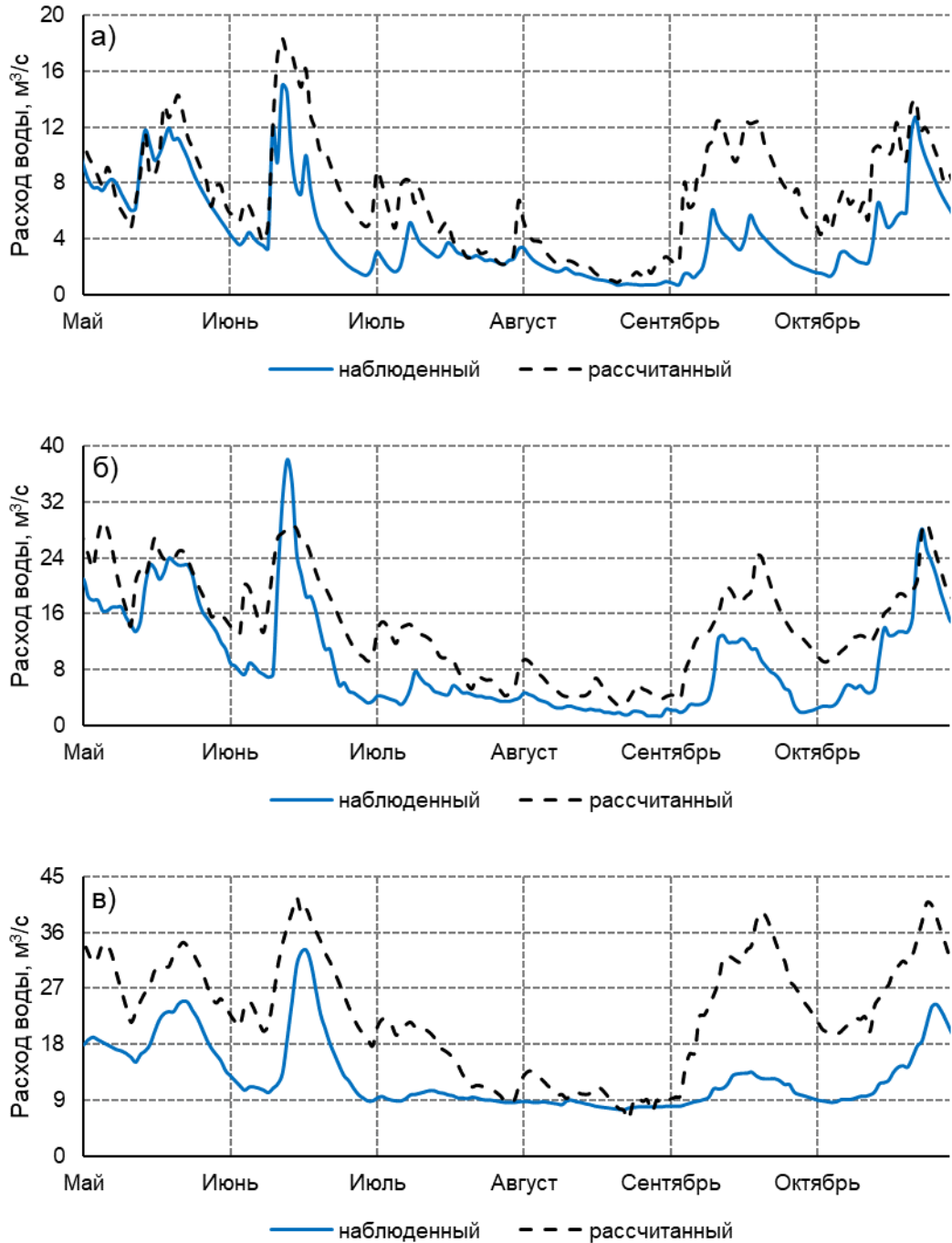


Рисунок 3.20 – Наблюденный и рассчитанный гидрографы стока а) р. Полометь – с. Яжелбицы, б) р. Полометь – д. Ермошкино, в) р. Полометь – с. Лычково за 2020 г. по сценарию № 7

Полученные результаты представлены в таблице 3.9, из которой следует, что модель чувствительна к новым видам входной информации, так как значения критериев качества моделирования отличаются в зависимости от количества осадкомерных пунктов, их расположения и временной дискретности.

Таблица 3.9 – Значения критериев NSE , KGE и δ 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	0,84	0,77	0,56	0,73	0,49	0,10	-0,05
	$KGE_{\text{сезон}}$	0,57	0,25	0,65	0,61	0,42	0,47	0,30	0,03	-0,05
	$\delta_{\text{сезон, \%}}$	-38,1	-48,7	-18,2	-33,6	-43,1	-39,3	-63,6	-88,3	-93,4
р.Полометь – д.Ермошкино	$NSE_{\text{сезон}}$	0,82	0,75	0,85	0,85	0,80	0,83	0,71	0,34	0,31
	$KGE_{\text{сезон}}$	0,63	0,50	0,75	0,69	0,63	0,65	0,43	0,11	0,10
	$\delta_{\text{сезон, \%}}$	-31,7	-46,8	-20,4	-23,3	-33,7	-32,3	-55,0	-78,1	-78,6
р.Полометь – с.Лычково	$NSE_{\text{сезон}}$	0,36	0,48	0,65	0,50	0,43	0,56	0,05	-0,80	-0,95
	$KGE_{\text{сезон}}$	0,02	0,15	0,13	0,21	0,10	0,09	-0,05	-0,37	-0,42
	$\delta_{\text{сезон, \%}}$	-48,2	-45,0	-15,6	-37,5	-44,1	-41,1	-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 δ 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 некорректным расчетом трансформации паводочной волны (распластывание паводка). Морфометрические характеристики определялись на основе цифровой модели рельефа, которая, вероятно, не учитывает особенности рельефа и русловой сети на участке от поста д. Ермошкино до с. Лычково. Так, перед постом д. Ермошкино пойма р. Полометь фактически исчезает, превращаясь за правой бровкой русла в обширную заболоченную низину, с понижением в сторону русла притока Поломети – реки Ямницы, а за бровкой левого берега - в долину притока Поломети – реки Хоронятки. Ниже поста д. Ермошкино при впадении в Полометь р. Хоронятки естественное русло реки заменено спрямляющим прямолинейным каналом, заканчивающимся за впадением р. Ямницы. До начала 1980–х годов состояние канала поддерживалось регулярным выполнением правил его эксплуатации. Начиная с конца 1980–годов расчистка канала прекратилась, и в настоящее время канал на всем его протяжении заполнен наносами и мусором, и не выполняет роль искусственного русла реки. Прежнего естественного русла реки на этом участке также практически не существует.

Разница между суточным моделированием и с шагом менее суток для сценариев заключается в процедуре расчета инфильтрации в модели SWAT. Метод Грин–Амт используется для срочных осадков, в то время как метод номерных кривых (SCS CN метод)

используется для суточных осадков. Так, на примере сопоставления результатов моделирования по часовым и суточным суммам осадков одного pluviографа наблюдаемый и рассчитанный гидрографы имеют некоторые различия (рисунок 3.21).

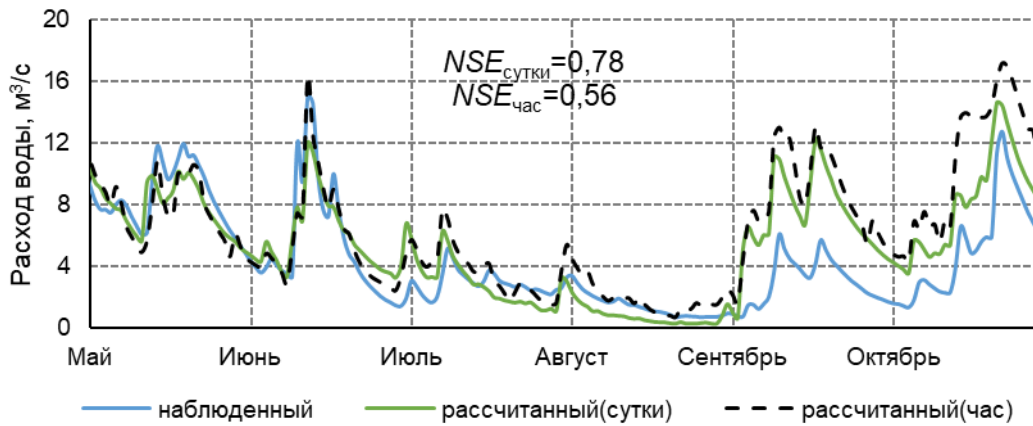


Рисунок 3.21 – Наблюдаемый и рассчитанные гидрографы стока р. Полометь – с. Яжелбицы по часовым и суточным суммам осадков за летне-осенний период 2020 г.

Процедура расчета инфильтрации выполняется в каждой гидрологической расчетной единице (HRU) с каждым временным интервалом, как функция матричного потенциала фронта смачивания и эффективной гидравлической проводимости. 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 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 значений элементов водного баланса (грунтовый, почвенный стока и испарение) гидрологического поста р. Полометь – с. Яжелбицы, рассчитанные методами номерных кривых и Грин–Ампт (рисунок 3.22).

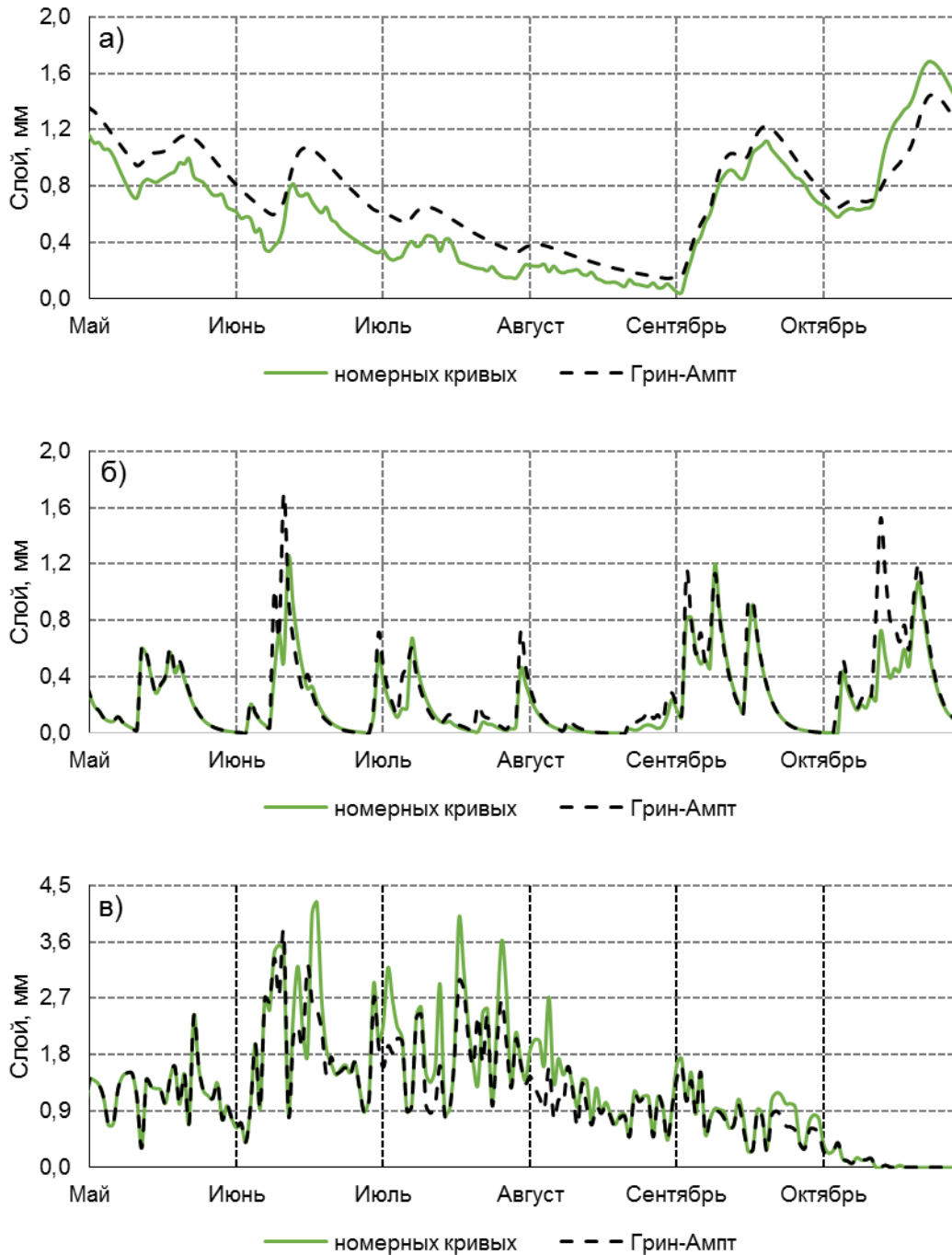


Рисунок 3.22 – Значения грунтового (а), почвенного (б) стока и испарения (в) для бассейна р. Полометь – с. Яжелбицы за летне-осенний период 2020 г., рассчитанные разными методами

Основные различия обнаружены в величине грунтового стока (рисунок 3.22а), а расхождения почвенного стока и испарения наблюдаются лишь при пиковых значениях (рисунок 3.22б – 3.22в).

На вывод о качестве моделирования также влияет и временной шаг, при котором оцениваются критерии эффективности. Так при увеличении интервала осреднения выходных данных до суток коэффициент *NSE* показывает более высокие значения (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Значения коэффициентов *NSE* и *KGE* при часовом и суточном осреднении выходных данных поста р. Полометь – с. Яжелбицы

Шаг осреднения № сценария	Час		Сутки	
	<i>NSE</i>	<i>KGE</i>	<i>NSE</i>	<i>KGE</i>
№ 5	0,55	0,43	0,56	0,42
№ 6	0,72	0,47	0,73	0,47
№ 7	0,48	0,30	0,49	0,30

Выводы

При сравнении результатов моделирования различных сценариев, основываясь на значениях критериев эффективности, наилучшие результаты получены с использованием радиолокационных данных метеорологического лоатора ДМРЛ–С «Валдай» (сценарии № 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 пловииографа «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.

Заключение

В рамках диссертационной работы были получены следующие результаты:

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 лоатора 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 лоатора и расчете невязки;
 - использование ежечасных данных об осадках позволяет существенно повысить качество моделирования максимальных расходов дождевых паводков.

Список использованной литературы

1. Айзель Г. В., Белозёров Е. В., Курочкина Л. С. Определение расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений: потенциал использования регионального сеточного реанализа речного стока //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. -2020. -№. 2. - С. 83-101.
2. Анисимов А. Е., Яровая Д. А., Барабанов В. С. Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона //Морской гидрофизический журнал. - 2015. - №. 4 (184). - С.14-28.
3. Бардин М. Ю., Платова Т. В. Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления //Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. - 2013. - Т. 25. - С. 71-93.
4. Беккер А., Капотова Н.И., Кондратьев С.А., Ливанова Н.А. Математическая модель процесса формирования дождевого стока с речного бассейна, предназначенная для использования в системе оперативного прогноза дождевых паводков// Тр. ГГИ. -1988. -Вып.331, -С.3-16
5. Бугаец А. Н. и др. Опыт применения модели SWAT для изучения гидрологического режима малого речного бассейна (река Комаровка, Приморский край) //Метеорология и гидрология. - 2018. - №. 5. - С. 68-79.
6. Виноградов А. Ю. Обоснование характеристик водопропускных сооружений лесных автомобильных дорог: Дис...:канд. техн. Наук: 05.21.01 – СПб. 2010.-125с.
7. Виноградов А. Ю., Соболев М. В., Никифоровский А. А. К вопросу о дееспособности СП 33-101-2003 в условиях новых требований //Научные труды SWorld. - 2012. - Т. 48. - №. 4. - С. 69.
8. Водные ресурсы России и их использование /под ред. И.А. Шикломанова. - СПб., ГГИ, 2008. - 600 с.
9. Водный режим почвогрунтов зоны аэрации в различные сезоны в Северо-Западной части лесной зоны ЕТС /Под редакцией В.С. Голубева и Н.А. Ливановой // Тр. ГГИ. – 1983. - Вып.289. - 43 с.
10. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ–С в синоптической практике: Введены в действие Приказом №52 от 14.02.2014 г.-М., Росгидромет, 2014.-110 с.
11. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М., Росгидромет, 2014, -58с.
12. Гавриков А. В. Атмосферные реанализы //URL: https://ocean.ru/phocadownload/pl_univer/pl_univer_2019_01.pdf ru (дата обращения: 08.01.2022)

13. Гельфан А. Н. и др. О проблеме тестирования гидрологической модели для оценки влияния изменений климата на речной сток //Метеорология и гидрология. – 2020. – №. 5. – С. 77-85.
14. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Лавренов А.А. Гидрологические последствия изменения климата в крупных речных бассейнах: опыт совместного использования региональной гидрологической и глобальных климатических моделей //Вопросы географии. - 2018. - №. 145. - С. 49-63.
15. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз //Фундаментальная и прикладная климатология. - 2021. - Т. 7. - №. 1. - С. 36-79.
16. Георгиади А. Г., Милюкова И. П., Кашутина Е. А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона //Водные ресурсы. - 2020. - Т. 47. - №. 6. - С. 651-662.
17. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2017. - №. 3. - С. 6-23.
18. Георгиевский В. Ю., Шалыгин А. Л. Гидрологический режим и водные ресурсы //Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: - 2012. - С. 53-86.
19. Георгиевский В.Ю., Георгиевский М.В., Голованов О.Ф., Шалыгин А.Л. Водные системы суши. Глава 4.1. – Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – 2014.– М.: Росгидромет, -С. 350-361.
20. 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
21. Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата./В сб.: Пленарные доклады VII Всероссийского гидрологического съезда, 19-21 ноября 2013 г. – СПб.; ГГИ, 2014, С. 79-102.
22. Георгиевский М. В., Голованов О. Ф. Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта СМIP5 //Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. - 2019. - Т. 64. - №. 2. - С. 206-218.
23. Голубев В.С., Коновалов Д.А., Симоненко А.Ю., Товмач Ю.В.. Корректировка измерений осадков и оценка их качества по данным Валдайской гидрологической станции //Метеорология и гидрология. - 1999. - №. 1. - С. 103-113.

24. Голубев В.С., Симоненко А.Ю. Сравнение измерений атмосферных осадков стандартными приборами различных стран на осадкомерном полигоне в Валдае. Отчет ГГИ по взаимосравнению измерений твердых осадков, -1996, -56 с.
25. Голубев В. С., Коновалов Д. А., Симоненко А.Ю. Оценка погрешностей измерения осадков Валдайской контрольной системой //Метеорология и гидрология. - 1997. - №. 7. - С. 108-116.
26. Гусев Е. М. Влияние горизонтальной неоднородности коэффициента фильтрации почвы на интенсивность впитывания //Метеорология и гидрология. - 1978. - №. 7. - С. 66-73.
27. Гусев Е.М. Методика расчета впитывания и поверхностного стока с учетом пространственной изменчивости фильтрационных свойств почвы.-География и природные ресурсы, -1980, -№1, Новосибирск: Наука, с.161-163.
28. Дмитриева В. А., Бучик С. В. Генезис максимумов водности рек и изменчивость водного режима в современный климатический период //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2016. - №. 5. - С. 50-62.
29. Единый Государственный Реестр Почвенных Ресурсов России // <http://egrpr.ru/> ru (дата обращения: 01.03.2021)
30. Епончинцева Д.Н., Клименко Д.Е. Оценка параметров кривых редукции ливневых осадков и формулы предельной интенсивности для территории Среднего Урала //Вестник КазНУ. Серия географическая. – 2015. – Т. 40. – №. 1.
31. Журавлев С. А., Бузмаков С.В., Курочкина Л.С., Шалашина Т.Л. Многолетняя изменчивость и тренды максимальных расходов воды весеннего половодья рек северо-запада Европейской России //Метеорология и гидрология. - 2017. - №. 6. - С. 99-108.
32. Золина О. Г. Статистическое моделирование экстремальных осадков и региональный атмосферный цикл влаги: :Дис. ... д-ра физ.-мат наук: 25.00. 30- Москва. 2018.-332 с.
33. Золина О. Г., Булыгина О. Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России //Фундаментальная и прикладная климатология. - 2016. - Т. 1. - С. 84.
34. Казачук А. А., Терский П. Н. Моделирование стока малой равнинной реки (на примере р. Велеса в бассейне Западной Двины) //Третьи Виноградовские чтения «На грани гидрологии». – 2018. – С. 722-727.
35. Капотова Н. И., Капотов А. А. Исследование водно-физических характеристик почвогрунтов территории Нечерноземной зоны РСФСР. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае//Тр. ГГИ. -1988.- Вып. 311. - С. 57.

36. Капотова Н.И., Капотов А.А., Кондратьев С.А., Ливанова Н.А. Опыт создания модели речного бассейна с использованием радиолокационной информации об осадках. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае//Тр. ГГИ. – 1986. -Вып. 311.– С. 542.
37. Капотова Н.И., Кондратьев С.А. Опыт применения гидродинамической модели формирования дождевого стока на лесном водосборе ВНИГЛ//Тр. ГГИ.-1983, -Вып.289, -С.30-36.
38. Киреева М. Б., Фролова Н. Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2013. – №. 1. - С. 60-76.
39. Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Телегина Е.А., Харламов М.А., Езерова Н.Н., Пахомова О.М. Паводочный сток на реках Европейской территории России и его роль в формировании современного водного режима //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2018. - №. 4. - С. 48-68.
40. Кислов А.В., Гребенец В.И., Евстигнеев В.М., Конищев В.Н., Сидорова М.В., Суркова Г.В., Тумель Н.В. Последствия возможного потепления климата в XXI веке на севере Евразии // Вестник Московского университета. Серия 5. География.- 2011.- №3 .- С. 4-9 .
41. Климат Санкт–Петербурга и Ленинградской области. ФГБУ "Северо–Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды". URL: <http://www.meteo.nw.ru> (дата обращения: 08.03.2022)
42. Козлов М.П., Зыков Н.А. О точности вычислений и изменчивости средних величин летних осадков на заданной площади //Тр. ГГИ. - 1954. - №. 46. - С. 89.
43. Кокорева Л.В., Кузнецова Ю.Н., Шалаева Т.А., 2005. Климат Валдая и тенденции его изменения//Исследования природного и историко-культурного комплексов Национального парка “Валдайский”: материалы к региональной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Национального парка “Валдайский”, 17 мая 2005 г. Валдай: ГУ НП “Валдайский”. - С. 74–77.
44. Кондратьев С.А., Ливанова Н.А., Капотов А.А., Толшина О.М., Осис В.Н. Опыт расчета дождевого паводка на р. Полометь по данным радиолокационных измерений осадков//Тр. ГГИ.- 1983, -Вып.289, -С.37-43.
45. Константинов А.Р. Испарение в природе. – Л.: Гидрометиздат, 1968. – 532 с.
46. Копалиани З.Д., Марков М.Л. Гидрологические исследования в Валдайском филиале ФГБУ «ГГИ»//Сборник работ по гидрологии, № 28, Санкт-Петербург: Петербургский модный базар. -2011. – С.140-158.

47. Корзун В.И. Сток и потери талых вод на склонах полевых водосборов. -Л., Гидрометеоиздат, -1968. -168 с.
48. Крестовский О.И. Формирование стока воды со склонов и малых водосборов. /В кн. Экспериментальные исследования гидрологических процессов и явлений. Часть 2. Изд-во Московского университета.- 1979. -С.21-26.
49. Лавров С. А., Калюжный И. Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги //Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2016. - №. 6. - С. 42-60.
50. Ливанова Н.А., Капотова Н.И., Кондратьев С.А., Чешева И.Л. Использование радиолокационной информации об осадках для прогноза гидрографа дождевого стока //Метеорология и гидрология. - 1984. - №11. - С. 92-101.
51. Лидов В.П., Зорина В.К., Орлова В.К., Углова Л.В., Результаты изучения водной эрозии в районе Валдая//Тр. ГГИ, -1973.- Вып. 207, -С.119-126.
52. Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю.,Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д. Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе //Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тбилиси, Грузия, 01–05 октября 2018 года – 2018. – С. 450-463.
53. Методические рекомендации к составлению справочника по водным ресурсам СССР. – Л.:Гидрометеоиздат, 1962. – 69 с.
54. Миллионщикова Т. Д. Моделирование и предвычисление многолетних изменений стока р. Селенги : автореферат дис.... канд. геогр. наук. 25.00.27-М. – 2019. -23с.
55. Морейдо В. М., Калугин А. С. Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в XXI в. На основе модели формирования стока //Водные ресурсы. - 2017. - Т. 44. - №. 3. - С. 275-284.
56. Н. И. Коронкевич, А. Г. Георгиади, С. В. Долгов, Е. А. Барабанова, Е. А. Кашутина, И. П. Милюков. Изменение стока снегового половодья на южном макросклоне Русской равнины в период 1930–2014 гг //Лёд и Снег. – 2018. – Т. 58. – №. 4. – С. 498-506.
57. Насонова О. Н., Гусев Е. М., Ковалев Е. Э. Воспроизведение гидрографов стока северных рек с использованием глобальных баз данных //Известия Российской академии наук. Серия географическая. - 2015. - №. 5. - С. 61-70.
58. Национальный атлас почв Российской Федерации // <http://soilatlas.ru/novgorodskay-oblast/>(дата обращения: 08.09.2021).
59. Обзор деятельности Росгидромета: <https://www.meteorf.ru/upload/iblock/0e0/20-03-2020-Obzor%202019-low.pdf>(дата обращения: 18.03.2021).

60. Поляк И. И. Оценивание линейного тренда временных метеорологических рядов //Тр. ГГО. 1975. №. 364. С. 51.
61. Попов В.Б. Метод восстановления полей осадков по наземным и радиолокационным данным с высоким пространственно-временным разрешением для территории Санкт-Петербурга: Дис ... канд. физ. мат. наук: 25.00.30. – Санкт-Петербург, 2018. – 130 с.
62. Пряхина Г. В. и др. Оценка стока с малых горных водосборов методами гидрологического моделирования //Вестник Московского университета. Серия 5. География. - 2017. - №. 1. - С. 29-37.
63. Радиолокационные измерения осадков / Под ред. А. М. Боровикова и В. В. Костарева . – Л. Гидрометеиздат, 1967.-140с.
64. Ресурсы поверхностных вод СССР Том 2. Карелия и Северо-Запад. Часть 1. / под ред. В.Е. Водогрецкого. - Л.: Гидрометеиздат, 1972. - 528 с
65. Рождественский А. В. Лобанова А. Г.. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным //СПб: Нестор-История. – 2010 -162с..
66. Рождественский А. В., Лобанова А. Г. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л., Гидрометеиздат.1984.-447 с..
67. Сазонов А.А., Крыленко И.Н., Амербаев А.Н., Завьялова Е.В., Гельфан А.Н., Семенова Н.К., Фролова Н.Л. Моделирование сценариев катастрофических наводнений на реке Северная Двина //Биомониторинг в Арктике: сборник тезисов докладов участников международной конференции (26-27 ноября 2018 года). – С. 179-182.
68. Сальман, Е. М. Радиолокационные исследования ливней и гроз // Тр. ГГО. - 1957. — Вып. 72.-С46-66.
69. Свод правил. СП 33–101–2003.-2004. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
70. Соколов А.А. Гидрография СССР. – Л., Гидрометеиздат, 1964. – 536 с.
71. Сутырина Е.Н. Изменчивость климатических факторов формирования стока рек водосборного бассейна оз. Байкал // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. — Иркутск: Изд-во Ирк. ун-та, 2018. - С. 334–339.
72. Терский П. Н., Кулешов А. А. Исследование формирования речного стока в Российской части бассейна Западной Двины с использованием гидрологической модели SWAT // Третьи Виноградовские чтения «На грани гидрологии». – 2018. – С. 234-239.
73. Урываев В.А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1953. - 232 с.

74. Федоров С. Ф. Экспериментальное изучение инфильтрации на слабоподзолистых почвах //Тр. ГГИ. - 1954. – №. 46. – С. 48.
75. Фролова Н. Л. и др. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России //Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – №. 7. – С. 14-26.
76. Хон В. Ч., Мохов И. И. Гидрологический режим бассейнов крупнейших рек Северной Евразии в XX-XXI вв //Водные ресурсы. – 2012. – Т. 39. – №. 1. – С. 3-3.
77. Шабанов П.А., Матвеева Т.А., Маркина М.Ю. Межгодовые изменения событий очень сильных осадков на европейской части России// Фундаментальная и прикладная климатология. –2017. –№ 4 – С. 106–123.
78. Яровая Д. А., Посошков В. Л. Параметры атмосферных осадков в Азово-Черноморском регионе на основе модельных и натурных данных //Морской гидрофизический журнал. – 2017. – №. 1 (193). – С. 11-26.
79. Ahnert P. Kalman filter estimation of radar-rainfall field bias //Preprints of the 23rd Conference on Radar Meteorology, 1986. – Amer. Meteor. Soc., 1986.
80. Arshad M. et al. Performance evaluation of ERA-5, JRA-55, MERRA-2, and CFS-2 reanalysis datasets, over diverse climate regions of Pakistan //Weather and Climate Extremes. – 2021. – Т. 33. – С. 100373.
81. Atencia A. et al. Effect of radar rainfall time resolution on the predictive capability of a distributed hydrologic model //Hydrology and Earth System Sciences. – 2011. – Т. 15. – №. 12. – С. 3809-3827.
82. Ayzel G., Kurochkina L., Zhuravlev S. The influence of regional hydrometric data incorporation on the accuracy of gridded reconstruction of monthly runoff //Hydrological Sciences Journal. – 2020. – С. 1-12.
83. Bárdossy A., Das T. Influence of rainfall observation network on model calibration and application //Hydrology and earth system sciences. – 2008. – Т. 12. – №. 1. – С. 77-89.
84. Bárdossy A., Pegram G. G. S. Space-time conditional disaggregation of precipitation at high resolution via simulation //Water Resources Research. – 2016. – Т. 52. – №. 2. – С. 920-937.
85. Bauwe A. et al. Does the temporal resolution of precipitation input influence the simulated hydrological components employing the SWAT model? //JAWRA Journal of the American Water Resources Association. – 2017. – Т. 53. – №. 5. – С. 997-1007.
86. Bell V. A., Moore R. J. A grid-based distributed flood forecasting model for use with weather radar data: Part 1. Formulation //Hydrology and Earth System Sciences. – 1998. – Т. 2. – №. 2/3. – С. 265-281.

87. Beven K. J. Rainfall-runoff modelling: the primer. – John Wiley & Sons, 2011.
88. Blacutt L. A. et al. Precipitation comparison for the CFSR, MERRA, TRMM3B42 and Combined Scheme datasets in Bolivia //Atmospheric Research. – 2015. – T. 163. – C. 117-131.
89. Blöschl G. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods //Nature. – 2019. – T. 573. – №. 7772. – C. 108-111.
90. Booij M. J. Modelling the effects of spatial and temporal resolution of rainfall and basin model on extreme river discharge //Hydrological sciences journal. – 2002. – T. 47. – №. 2. – C. 307-320.
91. Borga M., Anagnostou E. N., Krajewski W. F. Validation of a method for vertical profile of reflectivity identification through bright band simulation //Proc. III Int. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar. – 1995. – C. 331-343.
92. Braxton, E. GIS-based Radar Rainfall Verification / E. Braxton. — University of Oklahoma, 2006. — 24 p.
93. Browning K. A. Meteorological applications of radar //Reports on progress in physics. – 1978. – T. 41. – №. 5. – C. 761.
94. Bugaets A. N. et al. Modeling the hydrological regime of small testbed catchments based on field observations: a case study of the Pravaya Sokolovka River, the Upper Ussuri River basin //Water Resources. – 2019. – T. 46. – №. 2. – C. S8-S16.
95. Castaneda-Gonzalez M. et al. Impacts of regional climate model spatial resolution on summer flood simulation //EPiC Series in Engineering. – 2018. – T. 3. – C. 372-380.
96. Choi J., Olivera F., Socolofsky S. A. Storm identification and tracking algorithm for modeling of rainfall fields using 1-h NEXRAD rainfall data in Texas //Journal of Hydrologic Engineering. – 2009. – T. 14. – №. 7. – C. 721-730.
97. Cole S. J., Moore R. J. Distributed hydrological modelling using weather radar in gauged and ungauged basins //Advances in Water Resources. – 2009. – T. 32. – №. 7. – C. 1107-1120.
98. Condrón A., Bigg G. R., Renfrew I. A. Polar mesoscale cyclones in the northeast Atlantic: Comparing climatologies from ERA-40 and satellite imagery //Monthly weather review. – 2006. – T. 134. – №. 5. – C. 1518-1533.
99. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store: River Discharge and Related Historical Data from the Global Flood Awareness System: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cems-glofas-historical?tab=overview>.
100. Das T. et al. Comparison of conceptual model performance using different representations of spatial variability //Journal of Hydrology. – 2008. – T. 356. – №. 1-2. – C. 106-118.

101. Di Luzio M., Arnold J. G. Formulation of a hybrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input //Journal of hydrology. – 2004. – T. 298. – №. 1-4. – C. 136-154.
102. Emmanuel I. et al. Influence of rainfall spatial variability on rainfall–runoff modelling: benefit of a simulation approach? //Journal of hydrology. – 2015. – T. 531. – C. 337-348.
103. ERA5. Copernicus Climate Change Service (C3S)(2017): ERA5: Fifth Generation of ECMWF Atmospheric Reanalyses of the Global Climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). – 2017.
104. Erdin R., Frei C., Künsch H. R. Data transformation and uncertainty in geostatistical combination of radar and rain gauges //Journal of Hydrometeorology. – 2012. – T. 13. – №. 4. – C. 1332-1346.
105. Fabre C. et al. Assessment of sediment and organic carbon exports into the Arctic ocean: The case of the Yenisei River basin //Water research. – 2019. – T. 158. – C. 118-135.
106. Fabry F. et al. High resolution rainfall measurements by radar for very small basins: the sampling problem reexamined //Journal of Hydrology. – 1994. – T. 161. – №. 1-4. – C. 415-428.
107. Fares A. et al. Rainfall-runoff modeling in a flashy tropical watershed using the distributed HL-RDHM model //Journal of Hydrology. – 2014. – T. 519. – C. 3436-3447.
108. Fassnacht S. R. Dressler K. A., and Bales R. C., 2003: Snow water equivalent interpolation for the Colorado River Basin from snow telemetry (SNOTEL) data //Water Resour. Res. – T. 39.
109. Førland E. J. et al. Manual for operational correction of Nordic precipitation data //DNMI-Reports. – 1996. – T. 24. – №. 96. – C. 66.
110. Gassman P. W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions //Transactions of the ASABE. – 2007. – T. 50. – №. 4. – C. 1211-1250.
111. Gelfan A. et al. Climate change impact on the water regime of two great Arctic rivers: modeling and uncertainty issues //Climatic change. – 2017. – T. 141. – №. 3. – C. 499-515.
112. Geofabrik O. S. M. OpenStreetMap data extract. – 2017. ИЛИ OpenStreetMap Data Extracts // <http://download.geofabrik.de/>
113. Germann U. et al. REAL—Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography. – 2009. – T. 135. – №. 639. – C. 445-456.
114. Goudenhoofd E., Delobbe L. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates //Hydrology and Earth System Sciences. – 2009. – T. 13. – №. 2. – C. 195-203.

115. Grek 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. – T. 7. – №. 4. – C. 92.
116. Harrold T. W., English E. J., Nicholass C. A. The accuracy of radar-derived rainfall measurements in hilly terrain //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1974. – T. 100. – №. 425. – C. 331-350.
117. Hassler B., Lauer A. Comparison of Reanalysis and Observational Precipitation Datasets Including ERA5 and WFDE5 //Atmosphere. – 2021. – T. 12. – №. 11. – C. 1462.
118. Haylock M. R. et al. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006 //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2008. – T. 113. – №. D20.
119. Hwang S. H., Ham D. H., Kim J. H. A new measure for assessing the efficiency of hydrological data-driven forecasting models //Hydrological sciences journal. – 2012. – T. 57. – №. 7. – C. 1257-1274.
120. Isotta F. A., Vogel R., Frei C. Evaluation of European regional reanalyses and downscalings for precipitation in the Alpine region //Meteorologische Zeitschrift. – 2015. – T. 24. – C. 15-37.
121. Jeffrey S. J. et al. Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data //Environmental Modelling & Software. – 2001. – T. 16. – №. 4. – C. 309-330.
122. Jeong C. et al. Estimation of optimal grid size for radar reflectivity using a SWAT model //Journal of Hydro-Environment Research. – 2014. – T. 8. – №. 1. – C. 20-31.
123. Jeong J. et al. Development of sub-daily erosion and sediment transport algorithms for SWAT //Transactions of the ASABE. – 2011. – T. 54. – №. 5. – C. 1685-1691.
124. Jones E., Wing A. A., Parfitt R. A Global Perspective of Tropical Cyclone Precipitation in Reanalyses //Journal of Climate. – 2021. – T. 34. – №. 21. – C. 8461-8480.
125. Kalugin A. S. The impact of climate change on surface, subsurface, and groundwater flow: a case study of the Oka River (European Russia) //Water Resources. – 2019. – T. 46. – №. 2. – C. S31-S39.
126. Kannan N. et al. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000 //Journal of Hydrology. – 2007. – T. 332. – №. 3-4. – C. 456-466.
127. Kendall M. G. Rank Correlation Methods. – London: Griffin, 1990.
128. Kireeva M. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period //International Journal of River Basin Management. – 2020. – T. 18. – №. 4. – C. 491-502.
129. Kitchen M. Towards improved radar estimates of surface precipitation rate at long range //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1997. – T. 123. – №. 537. – C. 145-163.

130. Knoben W. J. M., Freer J. E., Woods R. A. Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores //Hydrology and Earth System Sciences. – 2019. – T. 23. – №. 10. – C. 4323-4331.
131. Kobold M., Brilly M. The use of HBV model for flash flood forecasting //Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2006. – T. 6. – №. 3. – C. 407-417.
132. Koskinen M. et al. Restoration of nutrient-rich forestry-drained peatlands poses a risk for high exports of dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus //Science of the Total Environment. – 2017. – T. 586. – C. 858-869.
133. Krajewski W. F., Smith J. A. Radar hydrology: rainfall estimation //Advances in water resources. – 2002. – T. 25. – №. 8-12. – C. 1387-1394.
134. Lobligeois F. et al. When does higher spatial resolution rainfall information improve streamflow simulation? An evaluation using 3620 flood events //Hydrology and Earth System Sciences. – 2014. – T. 18. – №. 2. – C. 575-594.
135. Looper J. P., Vieux B. E. An assessment of distributed flash flood forecasting accuracy using radar and rain gauge input for a physics-based distributed hydrologic model //Journal of Hydrology. – 2012. – T. 412. – C. 114-132.
136. Löwe R. et al. Probabilistic online runoff forecasting for urban catchments using inputs from rain gauges as well as statically and dynamically adjusted weather radar //Journal of Hydrology. – 2014. – T. 512. – C. 397-407.
137. Madsen H. et al. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe //Journal of Hydrology. – 2014. – T. 519. – C. 3634-3650.
138. Maharjan G. R. et al. Evaluation of SWAT sub-daily runoff estimation at small agricultural watershed in Korea //Frontiers of Environmental Science & Engineering. – 2013. – T. 7. – №. 1. – C. 109-119.
139. Mahmoud M. T., Hamouda M. A., Mohamed M. M. Spatiotemporal evaluation of the GPM satellite precipitation products over the United Arab Emirates //Atmospheric Research. – 2019. – T. 219. – C. 200-212.
140. Mann H. B. Nonparametric tests against trend //Econometrica: Journal of the econometric society. – 1945. – C. 245-259.
141. Marshall J. S. The distribution of raindrops with size //J. meteor. – 1948. – T. 5. – C. 165-166.
142. MERIT DEM: Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM // http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/list_5deg.html

143. Meselhe E. A. et al. Sensitivity of conceptual and physically based hydrologic models to temporal and spatial rainfall sampling //Journal of Hydrologic Engineering. – 2009. – T. 14. – №. 7. – C. 711-720.
144. Montesarchio V. et al. Evaluation of optimal rain gauge network density for rainfall-runoff modelling //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2015. – T. 1648. – №. 1. – C. 190004.
145. Morin E. et al. Rainfall modeling for integrating radar information into hydrological model //Atmospheric Science Letters. – 2005. – T. 6. – №. 1. – C. 23-30.
146. Nasonova O. N. et al. Application of the land surface model SWAP and global climate model INMCM4.0 for projecting runoff of northern Russian rivers. 1. Historical simulations //Water resources. – 2018. – T. 45. – №. 2. – C. 73-84.
147. Nasonova O. N. et al. Projecting changes in Russian northern river runoff due to possible climate change during the 21st century: A case study of the Northern Dvina, Taz and Indigirka rivers //Water Resources. – 2019. – T. 46. – №. 1. – C. S145-S154.
148. Neitsch S. L. et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. – Texas Water Resources Institute, 2011.
149. Nicholson S. E. et al. Validation of TRMM and other rainfall estimates with a high-density gauge dataset for West Africa. Part II: Validation of TRMM rainfall products //Journal of Applied Meteorology. – 2003. – T. 42. – №. 10. – C. 1355-1368.
150. Noh H. et al. Long-term simulation of daily streamflow using radar rainfall and the SWAT model: A case study of the Gamcheon basin of the Nakdong River, Korea //Advances in Meteorology. – 2016. – T. 2016
151. Ochoa-Rodriguez S. et al. A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications //Water Resources Research. – 2019. – T. 55. – №. 8. – C. 6356-6391.
152. Olivera F. et al. Estimation of average rainfall areal reduction factors in Texas using NEXRAD data //Journal of Hydrologic Engineering. – 2008. – T. 13. – №. 6. – C. 438-448.
153. Paulat M. et al. A gridded dataset of hourly precipitation in Germany: Its construction, climatology and application //Meteorologische Zeitschrift. – 2008. – T. 17. – C. 719-732.
154. Pfaff, T., 2010. Radargestützte Schätzung von Niederschlagsensembles. Technical Report. URL: http://www.rimax-hochwasser.de/fileadmin/user_uploads/RIMAX_PUB_22_0015_Abschlussbericht.
155. POWER Data Access Viewer // <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
156. Price K. et al. Comparison of radar and gauge precipitation data in watershed models across varying spatial and temporal scales //Hydrological Processes. – 2014. – T. 28. – №. 9. – C. 3505-3520.

157. Regional Revised River Runoff Reanalysis (R5): historical and projected river runoff data set for the northwest of the European part of Russia: <https://zenodo.org/record/4485391#.YSeCbDH7SUI>
158. Rico-Ramirez M. A. et al. A high-resolution radar experiment on the island of Jersey //Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling. – 2007. – T. 14. – №. 2. – C. 117-129.
159. Sada R. et al. Projected changes in climate and hydrological regimes of the Western Siberian lowlands //Environmental Earth Sciences. – 2019. – T. 78. – №. 2. – C. 1-15.
160. Schaefli B., Gupta H. V. Do Nash values have value? //Hydrological Processes. – 2007. – T. 21. – №. ARTICLE. – C. 2075-2080.
161. Schuurmans J. M., Bierkens M. F. P. Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model //Hydrology and Earth System Sciences. – 2007. – T. 11. – №. 2. – C. 677-693.
162. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau //Journal of the American statistical association. – 1968. – T. 63. – №. 324. – C. 1379-1389.
163. Sexton A. M. et al. Using NEXRAD and rain gauge precipitation data for hydrologic calibration of SWAT in a northeastern watershed //Transactions of the ASABE. – 2010. – T. 53. – №. 5. – C. 1501-1510.
164. Sharma S. et al. Spatial and temporal analysis of precipitation and its extremities in seven provinces of Nepal (2001–2016) //Applied Ecology and Environmental Sciences. – 2020. – T. 8. – №. 2. – C. 64-73.
165. Shkolnik I. et al. Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8. 5 scenario //Climate dynamics. – 2018. – T. 50. – №. 1. – C. 215-230.
166. Silver M. et al. An evaluation of weather radar adjustment algorithms using synthetic data //Journal of Hydrology. – 2019. – T. 576. – C. 408-421.
167. Sivasubramaniam K. et al. Can model-based data products replace gauge data as input to the hydrological model? //Hydrology Research. – 2020. – T. 51. – №. 2. – C. 188-201.
168. Skinner C., Bloetscher F., Pathak C. S. Comparison of NEXRAD and rain gauge precipitation measurements in South Florida //Journal of Hydrologic Engineering. – 2009. – T. 14. – №. 3. – C. 248-260.
169. Smith J. A. et al. An Intercomparison study of NEXRAD precipitation estimates //Water Resources Research. – 1996. – T. 32. – №. 7. – C. 2035-2045.
170. Smith J. A., Krajewski W. F. Estimation of the mean field bias of radar rainfall estimates //Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1991. – T. 30. – №. 4. – C. 397-412.

171. Smith M. B. et al. The distributed model Intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design //Journal of Hydrology. – 2004. – T. 298. – №. 1-4. – C. 4-26.
172. SOFTWARE & DATA TOOLS: <http://swat.tamu.edu/>
173. Tarek M., Brissette F. P., Arsenault R. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America //Hydrology and Earth System Sciences. – 2020. – T. 24. – №. 5. – C. 2527-2544.
174. Taskinen A., Söderholm K. Operational correction of daily precipitation measurements in Finland. – 2016.
175. Terskii P. et al. Assessment of water balance for Russian subcatchment of Western Dvina River using SWAT model //Frontiers in Earth Science. – 2019. – C. 241.
176. Van Griensven A. et al. Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries //Hydrology and Earth System Sciences. – 2012. – T. 16. – №. 9. – C. 3371-3381.
177. Wang L. P. et al. Radar–raingauge data combination techniques: a revision and analysis of their suitability for urban hydrology //Water science and technology. – 2013. – T. 68. – №. 4. – C. 737-747.
178. Ware E. C. Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data. – 2005.
179. Wilson J. W., Brandes E. A. Radar measurement of rainfall—A summary //Bulletin of the American Meteorological Society. – 1979. – T. 60. – №. 9. – C. 1048-1060.
180. Winchell M., Srinivasan R., Di Luzio M., Arnolds J.G. Arcswat Interface For Swat2012. User's Guide. – Texas, Blackland Research And Extension Center, ARS Temple, 2013. – 618 p.
181. WMO (World Meteorological Organization). Guide to hydrological practices. – 1994.
182. Wyss J., Williams E. R., Bras R. L. Hydrologic modeling of New England river basins using radar rainfall data //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1990. – T. 95. – №. D3. – C. 2143-2152.
183. Xu H. et al. Assessing the influence of rain gauge density and distribution on hydrological model performance in a humid region of China //Journal of Hydrology. – 2013. – T. 505. – C. 1-12.
184. Yang X. et al. Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China //Stochastic environmental research and risk assessment. – 2016. – T. 30. – №. 3. – C. 959-972.
185. Zappa G., Shaffrey L., Hodges K. Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis? //Monthly Weather Review. – 2014. – T. 142. – №. 8. – C. 2596-2608.
186. Zhang J. et al. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) quantitative precipitation estimation: Initial operating capabilities //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2016. – T. 97. – №. 4. – C. 621-638.

187. Zhu D., Xuan Y., Cluckie I. Hydrological appraisal of operational weather radar rainfall estimates in the context of different modelling structures //Hydrology and Earth System Sciences. – 2014. – T. 18. – №. 1. – C. 257-272.
188. Zhu Z., Wright D. B., Yu G. The impact of rainfall space-time structure in flood frequency analysis //Water Resources Research. – 2018. – T. 54. – №. 11. – C. 8983-8998.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 - Значения почвенных параметров, определенные по литературным источникам

Индекс	Тип почвы	Почвообразующая порода	Глубина слоя, мм	Гранулометрический состав, %			Sol_Awc, мм/мм	Sol_Bd, мг/м ³	Sol_k, мм/ч
				sand	silt	clay			
DERPODSOL	Дерново-подзолистые преимущественно мелко- и неглубокоподзолистые	Среднесуглинистые валунные	90	50	27	20	0,15	1,35	208
			1090	50	27	20	0,15	1,35	25
			2090	50	27	20	0,15	1,35	25
			3090	50	27	20	0,15	1,35	25
DERPODSOLCH	Дерново-подзолистые преимущественно мелко- и неглубокоподзолистые	Частая смена пород различного механического состава	90	50	27	20	0,15	1,35	208
			1090	50	27	20	0,15	1,35	25
			2090	50	27	20	0,15	1,35	25
			3090	50	27	20	0,15	1,35	25
PODILJ	Подзолы иллювиально-железистые (подзолы иллювиально-малогумусовые)	Песчаные	90	85	14	1	0,06	1,65	208
			1090	85	14	1	0,06	1,65	150
			2090	85	14	1	0,06	1,65	150
			3090	85	14	1	0,06	1,65	150
DERPODSOLILJ	Дерново-подзолистые иллювиально-железистые	Песчаные	90	85	14	1	0,06	1,65	208
			1090	85	14	1	0,06	1,65	150
			2090	85	14	1	0,06	1,65	150
			3090	85	14	1	0,06	1,65	150

Таблица А.2 – Значения коэффициентов шероховатости, определенные в соответствии с технической документацией модели SWAT

Река - пост	Параметр		
	CH_N1	OV_N	CH_N2
р.Лонница - д.Мосолино	0,014	0,10	0,14
р.Полометь - д.Дворец	0,014	0,10	0,14
р.Полометь - с.Яжелбицы	0,014	0,10	0,14
р.Полометь - д.Ермошкино	0,014	0,10	0,14
р.Полометь - с.Лычково	0,014	0,10	0,15