

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Денисова Ирина Сергеевна

**Гидрологический режим рек Московской агломерации
(на примере р. Сетунь)**

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре гидрологии суши
географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научные руководители** – **Чалов Сергей Романович**,
доктор географических наук
Болгов Михаил Васильевич,
доктор технических наук
- Официальные оппоненты** – **Поздняков Шамиль Рауфович**,
доктор географических наук, директор
Института исследований континентальных
водных объектов Российского государственного
гидрометеорологического университета
Васенев Вячеслав Иванович, доктор
биологических наук, профессор департамента
ландшафтного проектирования и устойчивых
экосистем Аграрно-технологического
института Российского университета
дружбы народов имени П. Лумумбы
Кашутина Екатерина Александровна,
кандидат географических наук, и.о. зав.
лабораторией гидрологии Института
географии Российской академии наук

Защита диссертации состоится «25» декабря 2025 г. в 17 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1,
Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на
портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3674>

Автореферат разослан « » ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Изменение гидрологического режима рек урбанизированных территорий является актуальной проблемой географических исследований. Интенсивная урбанизация Московской агломерации сопровождается увеличением площади водонепроницаемых поверхностей, интенсификацией хозяйственной деятельности и внедрением крупных инфраструктурных объектов, в том числе развитием коллекторной сети. Это приводит к трансформации естественного водного режима и ухудшению экологического состояния малых городских рек. Отмечается увеличение частоты и интенсивности ливневых осадков, что дополнительно повышает риски затопления территорий и увеличивает нагрузку на городскую инфраструктуру. Высокая доля искусственных покрытий, застройка пойм и сокращение площади зелёных территорий приводят к снижению пойменной ёмкости, деградации русловой сети и нарушению естественных процессов стока. Одновременно снижается рекреационный потенциал парков, расположенных в речных долинах.

Вместе с тем в Москве отсутствуют станции государственной гидрологической наблюдательной сети, а исследования малых рек крайне фрагментарны. Река Сетунь, одна из немногих рек Москвы, сохранившая открытое русло на большей части своей длины, является репрезентативной для изучения гидрологического режима: водосбор реки охватывает все основные типы землепользования города (жилую застройку, промышленные, коммунальные и рекреационные зоны) и имеет развитую транспортную инфраструктуру. Сохранность русловой сети р. Сетунь и расположение её водосбора почти исключительно в пределах городской черты (около 78% от общей площади) позволяют использовать реку как модельный объект для изучения гидрологического режима малой реки в условиях урбанизации.

Особенности формирования стока в пределах города изучены слабо, при этом нормативные документы по регулированию и расчёту поверхностного

стока, а также по защите малых рек не актуализируются. Комплексное исследование современного водного режима р. Сетунь с применением высокочастотного мониторинга и методов моделирования позволяет не только выявить масштаб и специфику антропогенного воздействия, но и заложить научную основу для принятия управленческих решений по сохранению и восстановлению малых рек в динамично растущих мегаполисах.

Степень разработанности темы исследования. Исследования гидрологического режима урбанизированных рек в РФ традиционно сосредоточены либо на узконаправленном изучении отдельных процессов (например, трансформации гидрологического режима, активизации эрозионных явлений, изменения гидрохимического состава вод, русловой морфологии и т.д.) [Лебедева, Михалёв, 2011; Ковалев и др., 2015 и др.], либо на оценках по крупным водным объектам. Сравнительно хорошо в этом отношении изучена Москва-река, где многолетние наблюдения позволили выявить основные закономерности изменения стока под влиянием урбанизации и гидротехнических сооружений [Коронкевич, Мельник, 2015, 2018]. Исследования малых городских водотоков остаются единичными [Фашевская и др., 2023; Ясинский и др., 2023; Шамов и др., 2025 и др.].

В отечественной практике изучение поверхностного смыва и переноса загрязняющих веществ в городах, в частности взвешенных наносов, берёт начало с работы [Куприянов, 1977]. Для некоторых российских городов выполнялись экспериментальные исследования с целью оценки диффузного смыва. Значительный вклад в развитие данного направления внесли учёные Института географии РАН [Китаев, 2001; Долгов, 2018; Ясинский, 2019; Ясинский и др., 2023], Института озероведения РАН [Кондратьев, Шмакова, 2019; Поздняков и др., 2020], Института водных проблем РАН [Михайлов, 2000; Данилов-Данильян и др., 2012; Данилов-Данильян, 2020; Полянин и др., 2023].

В зарубежной практике исследования сосредоточены преимущественно на моделировании городских стоков и качества воды с использованием

специализированных программных комплексов. Модель SWMM, применяемая в настоящем исследовании, широко используется в инженерных расчётах по всему миру [Crobeddu et al., 2008; Chow et al., 2012; Rhugwasanye et al., 2023], однако в России её применение весьма ограничено [Болгов, Коробкина, 2013; Болгов и др., 2020].

Цель исследования – анализ современных особенностей стока воды и наносов р. Сетунь и разработка модели паводочного стока на основе эмпирических высокочастотных данных.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Развитие, описание и методологическое обоснование подходов высокочастотного мониторинга водного стока р. Сетунь.
2. Эмпирическая оценка пространственно-временных особенностей формирования водного стока р. Сетунь с учётом изменения землепользования на водосборе.
3. Современная характеристика стока и состава взвешенных наносов р. Сетунь.
4. Адаптация гидрологической модели SWMM для воспроизведения паводочного стока р. Сетунь и оценка её возможностей для моделирования смыва взвешенных веществ.

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования выбран крупнейший правый приток Москвы-реки в черте столицы – р. Сетунь. Предметом исследования является водный режим и сток наносов малого урбанизированного водосбора.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Создана уникальная сеть высокочастотных наблюдений (с 30-минутным интервалом регистрации) за уровнями и расходами воды малого речного бассейна, расположенного в городской черте. Она впервые позволила выявить и дать количественную оценку ключевым особенностям водного стока урбанизированных территорий, включая кратковременные паводки (средней продолжительностью около 3 часов) с резким подъёмом и последующим снижением расходов воды.

2. Выполнены первые для рек городов РФ оценки вклада различных источников питания в формирование водного стока, его многолетних и сезонных изменений на фоне роста урбанизации.
3. С использованием современных средств автоматической регистрации впервые для городских рек получены и обработаны продолжительные (7 месяцев) ряды мутности воды с частотой записи от 1 до 10 минут, вместе с данными отборов проб взвешенных наносов (195 проб, собранных в течение 4 лет), позволившие получить наиболее детальную оценку стока наносов малых рек городов РФ.
4. На основе данных высокочастотного мониторинга впервые для малых рек Москвы разработана гидрологическая модель с временным шагом 30 минут, воспроизводящая формирование паводочного стока р. Сетунь.

Теоретическая и практическая значимость. В исследовании предложены и апробированы оригинальные методы анализа водного режима малых урбанизированных рек, учитывающие специфику городской среды. Эти методы расширяют рамки существующих гидрологических концепций, ориентированных главным образом на естественные водосборы, и адаптированы для описания сложных процессов в сильно урбанизированных бассейнах. В диссертации описаны методические особенности реализации высокочастотного мониторинга уровней и расходов воды малых городских рек и разработаны подходы к моделированию, позволяющие заполнить существенный пробел в теории городской гидрологии.

Результаты диссертации имеют прикладное значение для совершенствования нормативно-правовой базы и требований по управлению водными ресурсами в России, включая актуализацию положений Водного кодекса РФ в части учёта особенностей стока и качества воды в городских условиях. Предложенная модель формирования стока и смыва загрязняющих веществ в бассейне р. Сетунь может быть применена для других рек Московской агломерации – это позволит разрабатывать сценарные оценки и повышать эффективность природоохранных мер на уровне города. Результаты мониторинга и моделирования могут использоваться для оценки потенциальной

эффективности внедрения различных инфраструктурных и природоохранных решений, направленных на снижение диффузного загрязнения и защиту малых рек от деградации.

Методология и методы исследования. В работе применён широкий комплекс современных методологических подходов, включающий полевые, лабораторные, статистические, геоинформационные и моделирующие методы. Основой исследования служит многолетняя уникальная система высокочастотного мониторинга в бассейне р. Сетунь, развёрнутая на базе 5 стационарных пунктов, оснащённых автоматическими датчиками уровня воды (регистраторы HOBO U20L, Solinst, Keller) с дискретностью измерений в 30 минут. Для верификации расходных кривых использовались традиционные методы измерения скорости потока (ИСП-1М) и современные акустические доплеровские профилографы течений (ADCP). Для сглаживания и фильтрации временных рядов расходов был применён фильтр Савитцки–Голея, а для статистической обработки и анализа выбросов использовано программное обеспечение R с пакетом Phenofit и STATISTICA.

Автоматические датчики (Analite NEP-495, Aqua Troll) позволили регистрировать высокочастотные ряды мутности воды с дискретностью записи от 1 до 10 минут. Проведён параллельный отбор проб и лабораторный анализ весовой и оптической мутности, а также гранулометрического состава взвешенных веществ (метод лазерной дифракции).

Метеорологическая информация включала данные метеорологической станции МГУ и интерполированные значения с близлежащих метеостанций (метод кригинга) для учёта пространственной неоднородности осадков. Погрешность используемых данных об осадках проверялась на основе оценки пространственной корреляционной функции интенсивности осадков с использованием данных радиолокационных наблюдений (ДМРЛ) и дополнительных источников. Для станций с длительными рядами наблюдений за уровнями и расходами воды применён алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа и выделения фаз водного режима (алгоритм GrWat).

Математическое моделирование дождевого стока и смыва взвешенных веществ выполнено с использованием программного комплекса SWMM (Storm Water Management Model). Калибровка и верификация модели осуществлялись на основе многолетнего ряда высокочастотного мониторинга с использованием статистических критериев.

Основные защищаемые положения

1. Наличие кратковременных паводков продолжительностью около 3 часов является характерной особенностью городской р. Сетунь и определяет необходимость реализации высокочастотного мониторинга для изучения водного режима урбанизированных территорий.
2. Современный водный режим городской р. Сетунь отличается преобладанием кратковременных ливневых паводков над половодьем и существенной долей базисного стока (65% годового стока).
3. Мутность воды и модуль стока взвешенных наносов р. Сетунь до 4 раз превышают региональные значения за счёт значительного антропогенного увеличения доли тонкодисперсных фракций (крупностью менее 0,01 мм).
4. Модель формирования ливневого стока с входными данными на основе 10-минутных данных об интенсивности осадков позволяет с удовлетворительной точностью воспроизвести формирование паводочного стока р. Сетунь.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно либо при его непосредственном участии в коллективе соавторов. Автор принимала участие в проведении полевых работ на р. Сетунь, включая выполнение измерений расходов воды, обслуживание регистраторов (логгеров), отбор и подготовку проб воды, установку фотоловушки, а также организацию регулярного мониторинга и подготовку базы данных об уровнях и расходах воды за весь период наблюдений. Автором были обобщены и статистически обработаны полученные данные, подготовлены иллюстрации, таблицы, карты. Автором выполнена калибровка и верификация гидрологической модели SWMM, а также настройка и тестирование модели GrWat.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 4 работы, в том числе 3 статьи в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.016.2 по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (по географическим наукам).

Результаты работы использованы при выполнении проектов РНФ № 19-77-30004 «Технология оценки экологического состояния Московского мегаполиса на основе анализа химического состава микрочастиц в системе «атмосфера – снег – дорожная пыль – почвы – поверхностные воды» (Мегаполис), проекта Министерства высшего образования и науки № 075-15-2024-614 «Потоки потенциально токсичных элементов и соединений в речных бассейнах: технологии изучения, количественная оценка и прогноз», а также в рамках темы № FMWZ-2022–0001 государственного задания Института водных проблем РАН.

Апробация результатов исследования. Результаты работы представлены на конференциях: Международный круглый стол «Теория и практика повышения устойчивости урбанизированных территорий в чрезвычайных ситуациях» (в рамках XV Международного салона средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность – 2024») (Кубинка, 2024); Форум «Зелёные города БРИКС» (Москва, 2024); VIII Всероссийский объединённый метеорологический и гидрологический съезд (Санкт-Петербург, 2024); Первая научно-практическая конференция «О дальнейшем развитии российско-китайского сотрудничества в сфере охраны и рационального использования трансграничных водных объектов» (Санкт-Петербург, 2025); VI Виноградовские чтения: Гидрология нового поколения (Санкт-Петербург, 2025).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, перечня сокращений, списка литературы, включающего 195 источников, из которых 101 – на русском и 94 – на английском языках, а также 4 приложений. Объём диссертации составляет 158 страниц; основной текст изложен на 150 страницах и содержит 31 таблицу и 66 рисунков.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю – д.г.н. Чалову Сергею Романовичу за руководство и ценные научные советы на протяжении долгих лет совместного сотрудничества. Особую благодарность автор адресует второму научному руководителю – д.т.н. Болгову Михаилу Васильевичу за профессиональную помощь, развитие научных взглядов, внимание и неоценимую поддержку на всех этапах совместной работы.

Автор искренне признателен к.г.н. В.М. Морейдо, к.г.н. М.А. Самохину, к.г.н. Д.И. Соколову и к.г.н. М.Б. Киреевой за ценные консультации и содействие в обработке экспериментальных данных. Отдельная признательность направлена к.г.н. О.Н. Ериной и к.г.н. М.А. Терёшиной за помощь в получении фактических материалов для проведения данного исследования, а также к.г.н. М.А. Локощенко и сотрудникам Метеорологической обсерватории МГУ за предоставленные данные многолетних наблюдений и К.Б. Никольскому (начальнику Калужского ЦГМС) за данные по мутности бассейна р. Оки. За участие в полевых исследованиях автор благодарит А.А. Кацуру, О.Д. Лошкова и О.В. Лошкову.

Автор выражает глубокую признательность коллективу кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за предоставленную возможность проведения диссертационного исследования в рамках аспирантуры и создание благоприятной научной атмосферы на протяжении всего периода работы. Отдельную благодарность автор адресует сотрудникам Института водных проблем РАН за квалифицированные консультации и методическую поддержку при апробации результатов исследования в ходе научных семинаров.

Эта работа была бы невозможна без всесторонней поддержки П.А. Гребнева. Автор выражает искреннюю благодарность за помощь в проведении полевых исследований, экспертное содействие при разработке программных кодов, а также моральную поддержку на всех этапах работы над диссертацией. Особая благодарность семье за терпение и понимание, которые сопровождали автора на всём пути научного поиска.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены сведения об апробации исследования, а также описаны методы, использованные в работе.

Глава 1. Условия формирования гидрологического режима рек городов

Первая глава представляет анализ факторов, влияющих на гидрологический режим городских рек, основанный на обзоре литературы. Рассмотрены основные факторы трансформации водного режима и стока наносов в условиях урбанизации: 1) особенности городского климата; 2) модификация подстилающей поверхности и режима землепользования; 3) развитие систем водопользования и водоотведения; 4) изменение русловых процессов. Предложена систематизация рассмотренных воздействий, демонстрирующая комплексный характер трансформации гидрологических процессов под влиянием урбанизации.

Глава 2. Общая характеристика условий формирования стока в бассейне р. Сетунь

Во второй главе представлена характеристика исследуемого речного бассейна – р. Сетунь, крупнейшего правого притока Москвы-реки в черте столицы и во всём верхнем и среднем течении (длина 38 км, площадь водосбора 190 км²). Значительная часть водосбора урбанизирована и представлена жилой застройкой, промышленными зонами и дорожным полотном (**табл. 1**). По длине реки наблюдается двукратный рост площади жилой застройки и увеличение доли водонепроницаемых покрытий от 24,6% в верховьях до 37,9% в устье. В отдельных районах (водосбор р. Навершки) доля промышленных зон достигает 23,8%. Природные заказники занимают 3,2% водосбора, при этом их площадь сокращается, а оставшиеся участки становятся более фрагментированными [Крюков, Голубева, 2021].

Высокая степень урбанизации обуславливает значительное антропогенное воздействие на водный режим. Забор пресной воды составляет 3,8% от объёма стока, объём сточных вод оценивается величиной 5,5 млн м³ в 2020 г. и 20 млн м³ в 2024 г.¹. В бассейне р. Сетунь расположены 6 снегоплавильных пунктов², 74 водовыпуска [Самохин, Чалов, 2009], системы очистных сооружений³ и пруды с обгонными коллекторами, регулирующие водный режим преимущественно в верхней части водосбора.

Таблица 1

Типы землепользования на водосборах р. Сетунь в 2024 г.

Тип землепользования	Общая площадь, км ²	Доля от общей площади бассейна р. Сетунь, %	Доля от площади водосбора, %				
			C1	C2	C3	C4	C5
Природные заказники	5,7	3,0	0	0	1,2	0,03	3,2
Земли под застройку	1,3	0,7	0,7	0,4	0,5	4,5	0,7
Кладбища	3,4	1,8	4,7	1,2	1,5	0	1,4
Строительные площадки	6	3,2	3,7	3,3	3,2	3,9	3,1
Промышленные зоны	13,3	7,0	5,6	5,4	7,1	23,8	7
Свалки	0,6	0,3	2,0	0,6	0,6	0	0,4
Водоёмы	0,01	0,01	0	0	0	0	0,01
Жилые зоны	55	29,5	14,8	24,9	25,4	14,7	29,1
Лесные массивы	44,2	23,3	26,7	25,4	24	13,4	22,5
Проницаемые покрытия	—	—	75,4	67,4	66,1	70,5	62,1
Непроницаемые покрытия	—	—	24,6	32,6	33,9	29,5	37,9

¹ <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=513>

² <https://data.mos.ru/>

³ <https://wikimapia.org/>

Интенсивное антропогенное воздействие кардинально изменило морфологию речной сети р. Сетунь: искусственное спрямление русел привело к образованию прямолинейных участков длиной до 2 км на месте бывших излучин. В результате техногенной трансформации формируется ступенчатый продольный профиль с локальными базисами эрозии под мостовыми переходами, происходит интенсивное заиление русла с образованием отложений мощностью до 0,5 м, а также развиваются оползневые процессы [Чалов, Самохин, 2009].

В период 1979–2022 гг. наблюдается рост температуры воздуха ($0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$), который особенно выражен в зимне-весенний период и усиливается с начала XXI в. в связи с интенсификацией городского острова тепла [Чубарова и др., 2014]. Температурный контраст между центром Москвы и окружающими сельскими районами достигает 2°C [Кислов, 2017; Локощенко, 2017]. При стабилизации годовых сумм осадков (около 730 мм) отмечается изменение их сезонного распределения и увеличение интенсивности кратковременных ливней [Болгов, Арефьева, 2021; Локощенко, 2023].

Глава 3. Методы изучения водного режима малого урбанизированного водосбора

Третья глава посвящена характеристике мониторинговой сети и методам изучения водного режима р. Сетунь. С 2019 г. бассейн реки является объектом длительного комплексного мониторинга, проводимого географическим факультетом МГУ [Соколов и др., 2021; Цыпленков и др., 2021; Ерина и др., 2022; Чалов и др., 2023b, 2024; Денисова и др., 2025]. Всего установлено 10 станций: 5 из них (посты С1–С5) оснащены автоматическими датчиками уровня воды с дискретностью записи 30 минут, на 2 из них дополнительно определяются 30-минутные расходы, а на 7 станциях ведётся мониторинг мутности воды (**рис. 1**). Мониторинг уровней воды осуществляется с использованием погружных датчиков давления трёх типов (HOBO U20L, Solinst Levelogger 5 Junior и Keller DCX-22-ECO) (**табл. 2**).

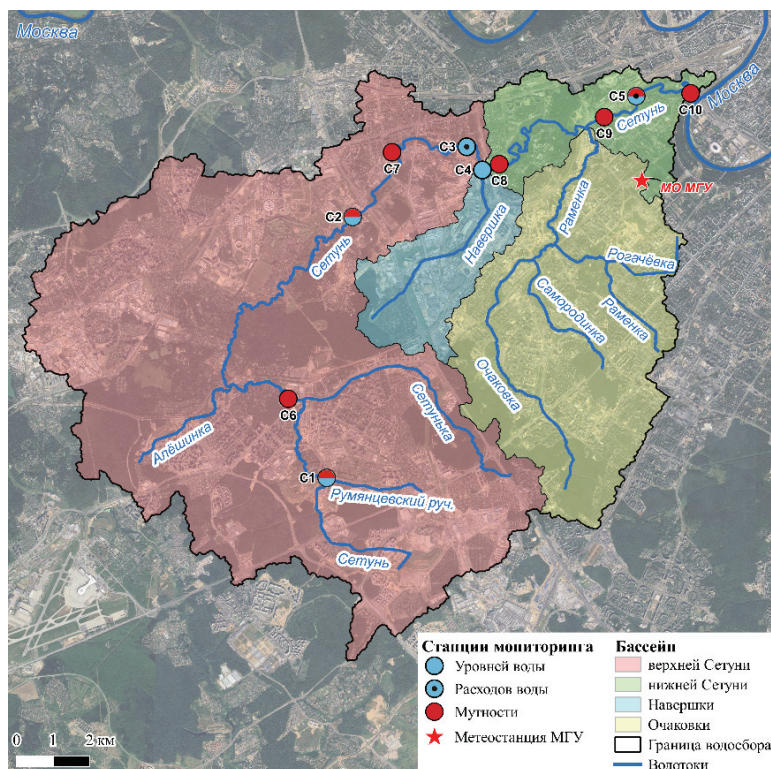


Рис. 1. Схема водосбора р. Сетунь и расположения станций мониторинга

Таблица 2

Описание автономной сети гидрологических станций

Пост	Река	Площадь бассейна, км ²	Расстояние до устья, км	Период измерений	Характеристика
C1	Сетунь	23,64	32	14.12.19 – 28.02.20	Уровни
C2	Сетунь	99,59	17	14.12.19 – 05.03.22	Уровни
C3	Сетунь	112,01	12	14.11.19 – 26.06.20 24.11.20 – 09.12.22 14.07.23 по н.в.	Уровни, расходы
C4	Навершка	11,2	0,1	24.11.20 – 12.07.21 30.09.21 – 11.04.22	Уровни
C5	Сетунь	180,14	2	14.11.19 – 14.04.25 08.05.25 – н.в.	Уровни, расходы, мутность

Измерения уровня воды скорректированы с учётом барометрической компенсации атмосферного давления с использованием данных метеостанции Балчуг. Обработка высокочастотных данных осуществлялась с применением

фильтра Савитцки-Голея для устранения выбросов и сглаживания временных рядов. Кривые расходов $Q = f(H)$ построены по данным геодезической съёмки (масштаб 1:500) с корректировкой уклонов русловых сечений до достижения соответствия между расчётными и измеренными значениями. На этой основе рассчитывались расходы воды с интервалом в 30 минут и точностью 6–9%, в диапазоне 1,6 м³/с (пост С3) и 16 м³/с (пост С5), что соответствует критериям ограничения экстраполяции 10%.

Для расчленения гидрографов стока применялся автоматизированный алгоритм GrWat, основанный на подходе, предложенном Б.И. Куделиным [Куделин, 1960; Рец и др., 2022]. При анализе выделялся базисный сток. В условиях преобразованного водного режима р. Сетунь под ним понимается непрерывно существующий сток, связанный с поступлением грунтовых и сточных вод, а также различных техногенных составляющих, в первую очередь поступлением вод из городских систем водоотведения, утечек из водопроводных сетей и других техногенных источников (полив дорог, топление снега, мойка машин и др.).

Анализ осадков выполнялся с использованием трёх взаимодополняющих источников данных. Первичные данные получены с помощью плювиографа метеорологической обсерватории МГУ (далее – МО МГУ) с дискретностью 10 минут. Для интерполяции 3-часовых данных ближайших метеостанций (МГУ, Внуково, Немчиновка) применён метод универсального кригинга [Терский и др., 2023]. Радиолокационные данные доплеровских метеорологических радиолокаторов (разрешение 1×1 км, дискретность 10 минут) обеспечили пространственно-распределённую информацию по 177 ячейкам водосбора [Михайлова, Овчинникова, 2024].

Изучение мутности воды проводилось с помощью непрерывных измерений нефелометрическими датчиками (диапазон 0–5000 NTU) и весового анализа 195 проб воды, отобранных на 7 станциях в 2019–2023 гг. в различные фазы водного режима (см. рис. 1). Образцы воды профильтрованы через стандартные мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм.

Гранулометрический состав взвешенных наносов определялся методом лазерной дифракции с расчётом медианного диаметра частиц d_{50} как ключевого показателя транспорта взвешенных веществ.

Реализация высокочастотного мониторинга позволила выявить ряд ключевых особенностей водного режима р. Сетунь, в первую очередь наличие быстрых колебаний уровней и расходов воды – кратковременных паводков. Резкие увеличения расходов воды со средней продолжительностью около 3 часов, сопровождающиеся быстрым подъёмом уровня до 1 м за час, регулярно фиксируются в течение всего года. Их наличие подтверждено натурным экспериментом на станции С5 в течение лета 2023 года, проведённым с использованием двух независимых датчиков уровня воды и одновременной автоматической фотофиксацией. В результате эксперимента были зафиксированы 13 резких увеличений расходов воды продолжительностью от 3 до 12 часов с ростом расходов от 3 до 9,5 раз по сравнению с предшествующим базовым расходом. Кратковременные паводки имеют ливневой генезис и в большинстве случаев совпадают с периодами выпадения осадков, однако трансформируются и усиливаются за счёт влияния сбросов с очистных сооружений, прудов, залповых поступлений вод из коллекторно-ливневой системы (подтверждено натурными обследованиями).

Выполнена оценка необходимости реализации высокочастотного мониторинга для описания водного режима малой городской реки. Анализ влияния частоты мониторинга на точность определения суточных расходов проводился для четырёх вариантов: из ряда расходов воды с частотой 30 минут выбирались значения, соответствующие однократному измерению (8:00), двум измерениям в течение суток (8:00 и 20:00) и четырём измерениям (8:00, 14:00, 20:00, 24:00). Для каждого варианта были сформированы ряды среднесуточных расходов воды на основе 48, 4, 2 и 1 измерения в сутки соответственно. Средние отклонения суточных расходов от значений высокочастотного мониторинга составляют 14% при однократных измерениях, 4% при двукратных и 2% при четырёхкратных. Однако существует риск неучёта краткосрочных паводков: максимальные отклонения достигают 506% при

однократном измерении, 86% при двукратном и 28% при четырёхкратном. Таким образом, высокочастотный мониторинг уровней и расходов воды следует рассматривать как необходимое условие для адекватной характеристики водного режима городских рек, в первую очередь из-за наличия кратковременных паводков (средняя продолжительность в нижнем течении р. Сетунь – 3 часа).

Глава 4. Эмпирическая оценка водного стока в малых реках.

Обработка сетевых наблюдений

Мониторинг на р. Сетунь установил ряд закономерностей, характеризующих отличия водного стока городской реки от региональных значений. В условиях интенсивной урбанизации (2020–2024 гг.) фиксируется доминирование базисного стока, составляющего 65% от годового объёма (табл. 3). Это объясняется значительной зарегулированностью стока и поступлением вод из городских систем водоотведения, включая сточные и ливневые воды, утечки из водопроводных сетей и другие технические источники. Значительную роль в увеличении базисного стока играют сточные воды. Согласно официальной статистике¹, их объём оценивается в 25,9% от среднегодового стока р. Сетунь.

Таблица 3

Характеристики гидрологического режима р. Сетунь в 2020–2024 гг. (станция С5)

Характеристика	2020	2021	2022	2023	2024
Дата начала половодья	02.03	25.03	03.04	12.03	16.03
Дата конца половодья	17.03	13.04	23.04	08.04	08.04
Средний расход за водохозяйственный год, м ³ /с	2,62	2,46	2,29	2,98	2,74
Максимальный расход за водохозяйственный год, м ³ /с	18,36	12,60	11,20	16,40	22,25
Доля базисного стока, %	65,71	63,33	60,88	63,21	53,54
Доля половодья, %	4,18	8,17	10,97	11,83	11,54
Доля дождевого стока, %	29,97	28,17	23,77	23,52	34,63
Доля оттепельного стока, %	0,06	0,50	4,02	1,18	0,00
Количество оттепельных паводков	2	2	4	5	1
Количество дождевых паводков	24	21	17	16	14

Особенностью водного режима р. Сетунь является преобладание летних дождевых паводков (25% от годового объёма) над весенним половодьем (10% от годового объёма). На трансформацию стока оказывают влияние как общие климатические тенденции, так и специфика формирования стока в условиях городской среды. В частности, это приводит к прохождению большого количества оттепельных и дождевых паводков, в несколько раз превышающих региональные значения: на реках Верхней Волги в среднем отмечается 7–10 паводков в год, из которых 6–8 дождевых [Горбаренко и др., 2021].

Сравнение данных ведомственного поста «Сложные эфиры» (1979–1988 гг.), функционировавшего в устье р. Сетунь, с современными наблюдениями (2019–2024 гг.) свидетельствует об относительной стабильности объёмов водного стока (снижение среднегодового расхода воды на 16,5% – с 2,85 до 2,38 м³/с, что при малой продолжительности рядов может определяться межгодовой динамикой). На фоне роста урбанизации наблюдаются значительные изменения сезонного распределения стока (**рис. 2**). По сравнению с периодом 1979–1988 гг. отмечается снижение водности весеннего половодья, обусловленное учащением зимних оттепелей и вывозом снега на снегоплавильные пункты. Выявлен рост повторяемости экстремальных дождевых паводков продолжительностью более 1 суток в 7–10 раз.

Сравнительный анализ р. Сетунь с р. Лусьянкой, имеющей сходные морфометрические параметры водосбора (площадь водосбора 174 км², длина 37 км), но протекающей в условиях минимальной антропогенной нагрузки, позволяет оценить отличия стока городской реки от условно-естественного режима. На городском водосборе среднегодовой расход выше (2,9 м³/с против 1,7 м³/с), что обусловлено влиянием антропогенных источников стока, а паводки формируются чаще за счёт водонепроницаемых покрытий и сбросов сточных вод. Максимальные расходы на естественном водосборе вдвое превышают городской (30,2 м³/с против 14,7 м³/с), а весеннее половодье длится дольше и составляет большую долю в годовом стоке (31% против 9%). Время добегания воды при экстремальных ливнях в бассейне р. Сетунь составляет всего 6–8 часов, тогда как на Лусьянке аналогичные осадки вызывают подъём

уровня воды только спустя 15 часов. При этом на урбанизированном водосборе при экстремальных осадках формируется двухмодальный гидрограф, не характерный для естественных условий [Чалов и др., 2023a].

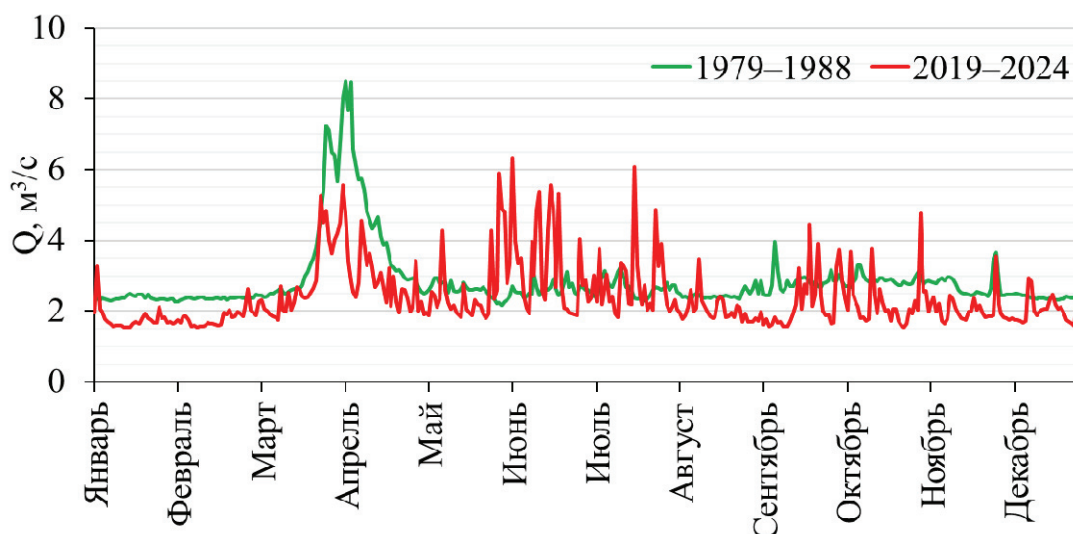


Рис. 2. Осреднённые суточные гидрографы р. Сетунь по г.п. Сложные Эфиры (1979–1988 гг.) и посту С5 сети наблюдений МГУ (2019–2024 гг.) (суточные расходы определены по измерениям в 8:00)

Глава 5. Пространственно-временные отличия формирования стока наносов в р. Сетунь

Мутность воды р. Сетунь в мониторинговых створах за период наблюдений меняется от 5,2 до 953,5 мг/л. Средняя мутность воды в устье (около 110 мг/л) в 3–4 раза превышает региональные значения, оцениваемые величиной 35 мг/л по [Караушев, 1977] и 25–50 мг/л по [Бобровицкая и др., 2008]. Для Москвы-реки выше города средняя мутность воды варьирует в пределах 9–24 мг/л [Чалов, Ефимов, 2021].

В межень (40 проб) средняя мутность в устьевом створе (С10) составляет 26,2–40,8 мг/л, в половодье (22 пробы) и паводки (10 проб) значения возрастают до 953,5 мг/л. Формируется относительно устойчивая связь расходов воды и мутности (**рис. 3**). Рост мутности в отдельные дни межени (до 92 мг/л) может объясняться эпизодическими залповыми сбросами из дренажно-коллекторной сети, обладающие незначительным объёмом, но повышенной

концентрацией взвешенных веществ [Соколов и др., 2021]. Во время прохождения половодья и паводков наблюдаются систематические отклонения – пики мутности часто не соответствуют максимумам расходов. Характерны резкие повышения мутности (в 3–9 раз) за короткие интервалы времени при незначительном росте расходов воды. Такие резкие колебания указывают на антропогенные источники поступления взвешенных веществ, включая попуски из ливневой канализационной системы и точечных источников загрязнения, и выражаются в ранее исследованных в р. Сетунь техногенных шлейфах мутности [Чалов и др., 2024].

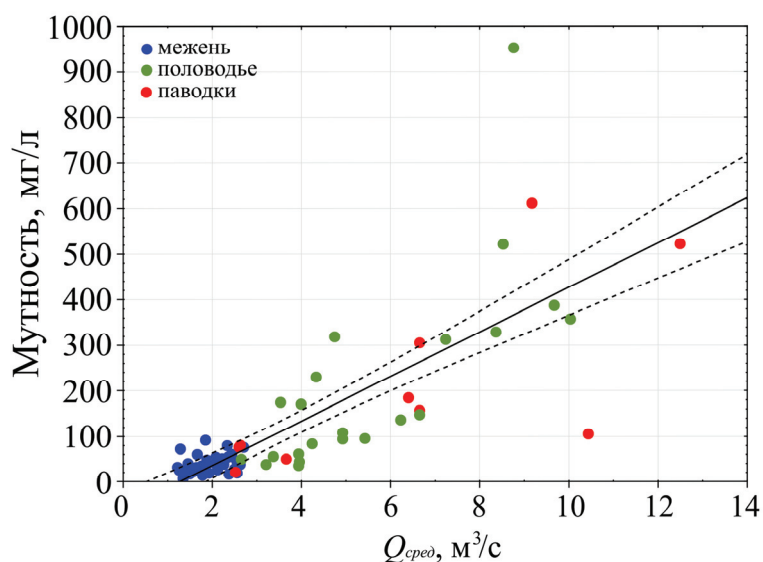


Рис. 3. Зависимость мутности воды, оценённой в результате обработки проб, от суточных расходов воды р. Сетунь во время различных фаз водного режима для станции С10 (сплошная линия – линия регрессии, пунктирные линии – 95% доверительный интервал)

Для выявления факторов формирования мутности проводилось сопоставление данных измерений в устьевом створе с метеорологическими показателями на МО МГУ (слой осадков, продолжительность, интенсивность за дождь, максимальная интенсивность за 30 мин, время между дождями). Выявлена связь мутности с максимальной интенсивностью осадков ($R^2 = 0,45$), однако низкая достоверность объясняется большим вкладом в сток наносов антропогенных источников (сбросы сточных вод, попуски из ливневой

канализации, дорожная пыль). Повышенная мутность в период половодья по сравнению с паводками свидетельствует об усиленном смыве в весенний период: таяние снега в городской среде приводит к быстрому притоку воды, который активно смывает наносы с дорожных покрытий.

В гранулометрическом составе взвешенных веществ р. Сетунь доминируют мелкодисперсные фракции (0,001–0,01 мм – 57,4%), медианный диаметр d_{50} , равный 0,032 мм, почти в 3 раза меньше регионального фона [Чалов, Ефимов, 2021]. Гранулометрический состав взвеси в р. Сетунь имеет двухмодальную форму, что обусловлено поступлением частиц бассейнового и руслового происхождения. Первый пик приходится на фракцию мелкого ила и составляет 38–43%, второй – на фракцию мелкой пыли с долей 26–33%. Во время паводков доля более крупных частиц может увеличиваться на ~5% из-за усиления русловых деформаций (рис. 4).

Гранулометрический состав стабилен независимо от фазы водного режима, что указывает на постоянство антропогенных источников поступления наносов в течение года. Доля крупных частиц ($>0,05$ мм) минимальна (2,9–12,2%), что свидетельствует о значительной роли дорожной пыли и сточных вод и согласуется с оценками 40–60% вклада антропогенных источников в формирование взвешенных веществ урбанизированных водотоков [Carter et al., 2003; Yin, Li, 2008].

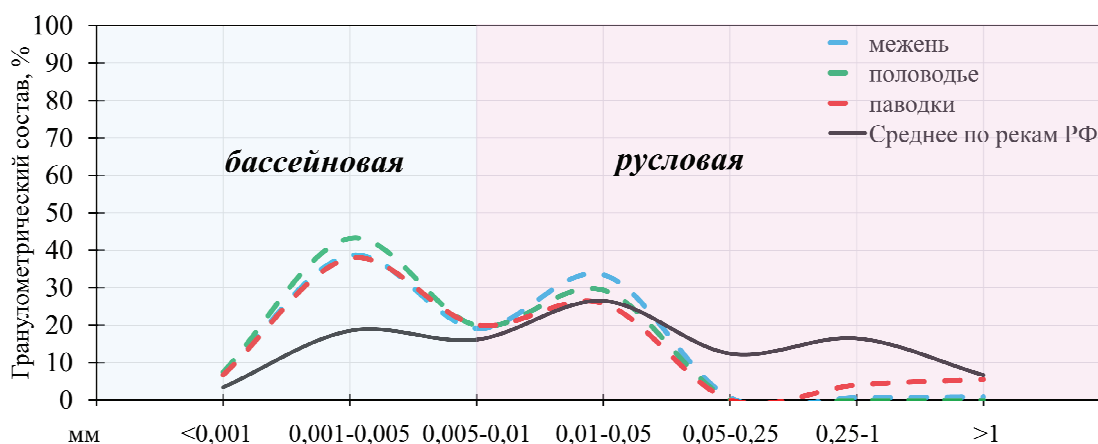


Рис. 4. Осреднённые значения гранулометрического состава взвешенных веществ для разных фаз водного режима (заливкой показаны области бассейновой (голубой) и русловой (розовый) составляющих стока наносов)

Глава 6. Модель формирования стока и смыва загрязняющих веществ с территории водосбора р. Сетунь

Модель формирования стока в условиях городской среды реализована с использованием программного комплекса Storm Water Management Model (SWMM), предназначенного для прогнозирования ливневого стока и качества воды на урбанизированных территориях [Rossman, Simon, 2022].

Для создания гидрологической модели формирования паводочного стока в бассейне р. Сетунь на базе SWMM проведена разбивка водосбора на 20 подводосборов, выполненная с учётом цифровой модели рельефа и доли непроницаемых поверхностей (5–20%). Используются кривые инфильтрации Хортон и коэффициенты шероховатости Маннинга для проницаемых и непроницаемых участков. Гидравлическая маршрутизация осуществляется решением уравнений Сен-Венана. Модель откалибрована по 16 паводкам 2020–2023 гг. с пространственной интерполяцией осадков методом кригинга. Процесс калибровки заключался в итеративном подборе параметров до достижения совпадения между смоделированными и фактическими измерениями расхода воды (рис. 5).

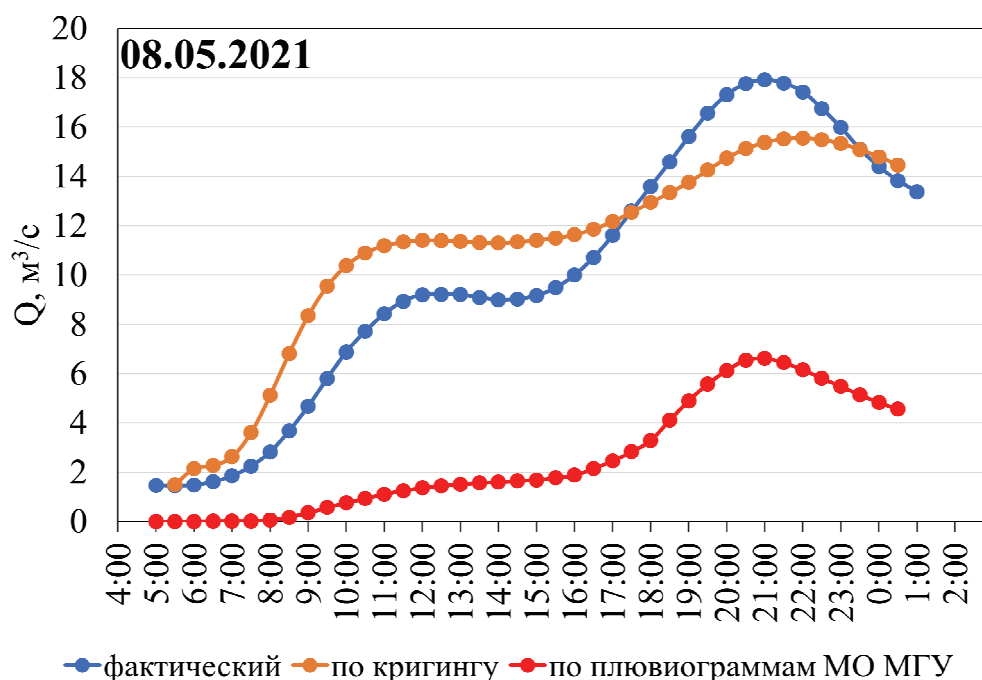


Рис. 5. Сравнение фактических и смоделированных в SWMM расходов воды

Достоверность гидрологических расчётов оценивалась по двум показателям (табл. 4) – относительной погрешностью R_E максимального расхода каждого паводка и коэффициентом детерминации R^2 максимальных фактических и смоделированных расходов. Калибровка и верификация параметров гидрологической модели показали хорошие результаты для паводков с максимальными расходами в диапазоне от 10 до 20 м³/с, тогда как для более малых или экстремально высоких расходов точность моделирования была значительно ниже.

Таблица 4

Результаты статистического анализа фактических и смоделированных расходов воды (зелёный – модель считается хорошей, голубой – удовлетворительной, красный – неудовлетворительной)

№	Дата	Максимальный фактический расход, м ³ /с	R_E , %
1	20.06.2020	26,9	45
2	08.05.2021	17,9	13
3	27.05.2021	7,1	56
4	27.06.2021	10,7	4
5	28.06.2021	30,3	44
6	01.07.2021	6,0	82
7	17.07.2021	9,0	22
8	30.07.2021	6,6	66
9	03.08.2021	15,3	26
10	12.08.2021	16,0	20
11	18.08.2021	14,4	22
12	03.09.2021	12,8	13
13	20.09.2021	8,2	33
14	15.10.2021	7,9	41
15	22.09.2022	10,8	2
16	27.07.2023	26,6	33

В некоторых случаях моделируемые значения расходов имели большую погрешность, которая связана с неравномерностью пространственного распределения осадков (погрешность 20% и выше для интенсивных кратковременных осадков) [Гандин, Каган, 1976]. Поскольку качество входной информации по осадкам определяет верхний предел точности моделирования, полученные результаты (средняя относительная погрешность 33%) можно рассматривать как обладающие удовлетворительной точностью.

Для моделирования накопления и смыва взвешенных веществ в SWMM использовались функции накопления и экспоненциального смыва, параметры которых (максимальное накопление, константа скорости накопления, коэффициент и показатель степени смыва) задавались в зависимости от типа землепользования (жилые, коммерческие, промышленные, зелёные зоны) и уточнялись при калибровке по фактическим данным. Калибровка проводилась по 10 паводкам 2021 г., проверка – на периоде май–октябрь 2021 г.

Относительная погрешность модельных расчётов средней мутности за паводок (по данным логгера мутности) составила 5–88%. Наилучшие результаты моделирования были получены для паводков с большим интервалом времени между осадками. При этом SWMM недооценивает мутность при длительных бездождных периодах с малым слоем стока, но переоценивает её при кратковременных интенсивных осадках с большим слоем стока. Это указывает на то, что при экстремальных осадках активизируются неучтённые в модели источники загрязнения и нелинейные процессы смыва, что ограничивает применимость SWMM для прогнозирования качества воды при интенсивных ливнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В бассейне р. Сетунь в период 2019–2024 гг. создана сеть автоматических наблюдений за уровнем и расходом воды. Высокочастотная (1 раз в 30 минут) частота записи определена как важнейшая составляющая мониторинга городской реки, на основе которой фиксируются быстрые

колебания водного стока (кратковременные паводки) со средней продолжительностью 3 часа и увеличением расходов воды до 9,5 раз по сравнению с предшествующими подъёму значениями. Применение стандартных методов измерения (измерения 1 или 2 раза в сутки – в 8:00 или 8:00 и 20:00) может приводить в условиях р. Сетунь к отклонениям определений суточного расхода воды до 506% при однократном измерении и 86% при двукратном, соответственно.

2. Расположение р. Сетунь в пределах города определяет структуру земельного покрова – рост относительной площади жилой застройки по мере движения от периферийных территорий к городскому центру в два раза определяет увеличение доли водонепроницаемых покрытий. Существенное воздействие производственных и коммунальных сточных вод, а также вод ливневой канализационной системы нивелирует влияние типов подстилающей поверхности на гидрологический режим реки. Дополнительным фактором выступает территориальная неоднородность в распределении атмосферных осадков, которая усложняет установление чётких зависимостей между степенью преобразования водосбора и гидрологическим откликом.

3. В структуре питания р. Сетунь доминирует базисный сток (около 65%), состоящий из грунтовых (подземных) вод и вод техногенного происхождения. Доля сточных вод составляла 25,9% от годового стока. За период наблюдений 2020–2024 гг. доля весеннего половодья в годовом стоке варьировала от 4 до 12%, а объём дождевого стока составлял 15–35%. По сравнению с региональными показателями отмечается значительное увеличение количества оттепельных и ливневых паводков.

4. По мере роста урбанизации по сравнению с данными гидрологических наблюдений второй половине XX в., наблюдается трансформация сезонного гидрографа стока р. Сетунь, в первую очередь снижение расходов воды в период весеннего половодья и увеличение роли дождевых паводков. Снижение водности весеннего половодья связано с участвовавшими зимними оттепелями и практикой механического удаления снега с городских территорий. Рост числа дождевых паводков связан с интенсификацией кратковременных ливней,

отмечаемой с конца XX в., и уменьшением водопроницаемости подстилающей поверхности вследствие увеличения площади застройки.

5. В условиях высокой антропогенной нагрузки средняя мутность воды в устье р. Сетунь составляет 110 мг/л с выраженными различиями по фазам водного режима: от 6,9–92,1 мг/л в межень до максимальных 953,5 мг/л в половодье. Доминирование антропогенных источников подтверждается характером изменения мутности в виде резких всплесков концентрации при малых изменениях расходов воды и статистически значимой связью с максимальной интенсивностью осадков ($R^2 = 0,45$).

6. Гранулометрический состав взвеси в р. Сетунь равномерен вне зависимости от фазы водного режима: мелкодисперсные фракции (0,001–0,01 мм) составляют в среднем 57,4% всего объёма частиц. Медианный диаметр частиц равен 0,032 мм, почти в три раза меньше регионального фона (0,083 мм). Распределение имеет двухмодальную структуру с пиками на фракциях мелкого ила (38–43%) и мелкой пыли (26–33%), тогда как доля крупных частиц ($>0,05$ мм) минимальна и варьирует от 2,9 до 12,2%. Такая однородность указывает на постоянство основных источников наносов в течение года.

7. С помощью модели SWMM воспроизведено формирование экстремальных паводков в 2020–2023 гг. с учётом 30-минутных данных о расходах воды и 10-минутных интенсивностей осадков, интерполированных в центр водосбора р. Сетунь. Результаты проверки показали хорошее совпадение максимальных расходов воды ($R^2 = 0,82$ для совокупности всех паводков), причём наиболее адекватные результаты были получены для паводков с максимальными расходами в диапазоне от 10 до 20 м³/с. Интерполяция осадков выполнена с погрешностью 20% и выше, а средняя относительная погрешность расчётов максимальных расходов составила 33%, что обеспечивает удовлетворительную точность моделирования.

8. Моделирование смыва взвешенных веществ в SWMM затруднено эмпирической природой алгоритмов накопления и экспоненциального смыва: модель адекватно воспроизводит средние значения мутности для отдельных

событий ($R^2 = 0,94$ для совокупности всех паводков при средней относительной погрешности 37%), однако при непрерывном моделировании демонстрирует значительные ошибки (до нескольких сотен процентов). Роль русловых размывов и наличие нескольких источников взвешенных наносов ограничивают точность моделирования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Kasimov N., Chalov S., Chubarova N., Kosheleva N., Popovicheva O., Shartova N., Stepanenko V., Androsova E., Chichaeva M., Erina O., Kirsanov A., Kovach R., Revich B., Shinkareva G., Tereshina M., Varentsov M., Vasil'chuk J., Vlasov D., **Denisova I.**, Minkina T. Urban heat and pollution island in the Moscow megacity: Urban environmental compartments and their interactions // Urban Climate. 2024. vol. 55. p. 101972. DOI 10.1016/j.uclim.2024.101972. 2,31 п.л. Импакт-фактор 1,56 (SJР). Доля участия 1/20.
2. **Денисова И.С.**, Лошков О.Д., Самохин М.А., Чалов С.Р. Формирование водного стока малой городской реки Сетуни (Москва) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2025. Т. 80. №. 1. С. 134–144. DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.10. 1,27 п.л. Импакт-фактор 0,24 (SJР). Доля участия 1/4.
3. **Денисова И.С.**, Болгов М.В. Экспериментальные исследования и моделирование дождевых паводков на урбанизированных территориях Московской агломерации (на примере р. Сетуни) // Известия Русского географического общества. 2025. Т. 157. № 2. С. 224–244. DOI 10.31857/S0869607125020051. 2,42 п.л. Импакт-фактор 0,54 (РИНЦ). Доля участия 1/2.

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях:

4. Чалов С.Р., Морейдо В.М., **Денисова И.С.**, Солонилов И.А. Высокочастотный мониторинг и модели машинного обучения для оценки синоптической изменчивости стока взвешенных наносов малой городской реки // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. № 5(1). С. 59–74. DOI 10.34753/HS.2023.5.1.59. 1,85 п.л. Импакт-фактор 0,29 (РИНЦ). Доля участия 1/4.