

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Денисова Ирина Сергеевна

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

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук
Чалов Сергей Романович

Второй научный руководитель:
доктор технических наук
Болгов Михаил Васильевич

Москва – 2025

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Условия формирования гидрологического режима рек городов	10
1.1. Изменения климатических условий формирования стока в городской среде.....	14
1.2. Изменение подстилающей поверхности и режима землепользования в условиях городов и их влияние на гидрологические процессы	17
1.3. Влияние водопользования и водоотведения на режим городских рек.....	22
1.4. Воздействие на русловые процессы и транспорт наносов	26
Глава 2. Общая характеристика условий формирования стока в бассейне р. Сетунь	33
2.1. Общие сведения о бассейне	33
2.2. Гидроклиматические особенности бассейна.....	43
2.3. Особенности развития русел рек бассейна	46
Глава 3. Методы изучения водного режима малого урбанизированного водосбора	52
3.1. Характеристика гидрологического мониторинга в бассейне р. Сетунь	52
3.2. Статистические операции	59
3.3. Валидация пиковых расходов.....	63
3.4. Методика расчленения гидрографа GrWat.....	67
3.5. Обработка метеорологических данных	69
3.6. Методы анализа стока взвешенных наносов.....	72
Глава 4. Эмпирическая оценка водного стока в малых реках. Обработка сетевых наблюдений.....	76
4.1. Оценка многолетних изменений стока	76
4.2. Особенности современного сезонного стока. Источники питания р. Сетунь	85
Глава 5. Пространственно-временные отличия формирования стока наносов в р. Сетунь.....	90
5.1. Пространственно-временные закономерности формирования мутности воды р. Сетунь	90
5.2. Характеристика состава взвешенных наносов р. Сетунь	100
Глава 6. Модель формирования стока и смыва загрязняющих веществ с территории водосбора р. Сетунь	106
6.1. Реализация гидрологического блока модели SWMM	108
6.1.1. Калибровка модели.....	109
6.1.2. Верификация модели.....	117
6.1.3. Моделирование дождевых паводков на р. Сетунь	118
6.2. Реализация блока смыва модели SWMM	123

6.2.1. Калибровка и верификация модели	123
6.2.2. Оценка диффузного стока взвешенных веществ с территории бассейна р. Сетунь	125
Заключение.....	132
Перечень сокращений	134
Список литературы	135
Приложения.....	151
Приложение 1. Перечень основных водоёмов в пределах бассейна р. Сетунь	151
Приложение 2. Перечень водовыпусков в р. Сетунь	152
Приложение 3. Уровни, измеренные на мониторинговой сети на р. Сетунь	155
Приложение 4. Подводосборы бассейна р. Сетунь, определённые для модели SWMM ..	158

Введение

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 рус洛вой 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 управлеченческих 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 [Фащевская 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 [Crobbeddu 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 аprobированы 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 НОВО 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 кrigинга) 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 аprobации 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.

Глава 1. Условия формирования гидрологического режима рек городов

Московская агломерация, включающая в себя Москву (около 2,6 тыс. км²) и её пригородную зону в радиусе 70 км от границы Московской кольцевой автодороги (далее – МКАД) (около 21,6 тыс. км²), является одной из крупнейших городских агломераций мира. В ней проживает около 21,5 млн человек, из которых 13 млн – в черте города [Kasimov et al., 2024]. Для сравнения, по данным 1996 г. [Глушкова, 1997], площадь агломерации составляла 13,6 тыс. км² (в том числе Москвы 1,1 тыс. км²), при численности населения 13,4 млн человек (в том числе Москвы 8,7 млн человек).

В последние десятилетия в Москве фиксируется устойчивая тенденция роста частоты и интенсивности ливневых осадков. Это привело к многократному увеличению числа экстремальных событий, сопровождающихся подтоплениями территорий и значительным экономическим ущербом. Эти изменения проявляются неравномерно, поскольку климат столицы формируется сложной системой локальных метеорологических условий, зависящих от плотности застройки, типа подстилающей поверхности и антропогенной деятельности в различных районах города [Кислов, 2017].

Особенно остро эти процессы наблюдаются в районах плотной городской застройки, где искусственные покрытия занимают большую часть водосборных территорий. Высокая доля водонепроницаемых поверхностей и ограниченные уклоны вертикальной планировки затрудняют поверхностный сток. В сочетании с повышенной нагрузкой на ливневую канализацию и со снижением пойменной ёмкости рек вследствие застройки пойм это создаёт риски затопления и способствует переносу загрязняющих веществ (далее – ЗВ) в водные объекты [Ромзайкина и др., 2024]. Деградация малых городских рек Москвы, тесно связанная с этими процессами, усиливается из-за неконтролируемой застройки водосборов и сокращения площади незапечатанных и озеленённых территорий. Постепенная потеря естественных дренажных систем снижает способность городской среды к саморегуляции и ограничивает средорегулирующие функции приречных зон в формировании экологического каркаса. При этом экосистемы открытых и незастроенных участков пойм сохраняют важное значение: они способствуют естественному регулированию поверхностного и подземного стока, стабилизации микроклимата и повышению устойчивости гидрологического режима города [Илларионова, Климанова, 2023].

В Московской агломерации действует разветвлённая система мониторинга качества водных объектов, которая включает как автоматические, так и классические гидропосты, обслуживающие наблюдателями. При этом следует отметить существенное различие в развитии двух направлений наблюдений: сеть мониторинга качества воды является достаточно развитой,

в то время как стоковые станции для изучения водного баланса практически отсутствуют. Согласно данным Центрального УГМС (управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды), на территории Московской области действует 29 речных и 5 озёрных гидропостов, из них 14 оборудованы автоматическими гидрологическими комплексами, которые могут выполнять измерения с дискретностью до 10 минут¹. Гидрологический и экологический мониторинг водных объектов г. Москвы обеспечивают два предприятия – ГУП «Мосводосток» и акционерное общество (АО) «Мосводоканал». Первое отвечает за сбор, транспортировку и очистку поверхностного стока. В его ведении также находятся эксплуатация ливневой канализации, водовыпусков, снегоплавильных пунктов, а также техническое обслуживание городских водных объектов². Мосводоканал обеспечивает город питьевой водой, занимается забором, очисткой и отведением бытовых и промышленных сточных вод, а также утилизацией снежного покрова. Компания располагает крупнейшими в стране очистными сооружениями, развитой сетью насосных станций и системой непрерывного мониторинга качества воды³. Дополнительно, ГПБУ «Мосэкомониторинг» проводит регулярный пробоотбор и анализ физико-химических показателей воды на более 60 контрольных створах, расположенных на 24 городских водных объектах, включая рр. Москву, Сходню, Сетунь, Яузу, Пахру, Десну, Сосенку и др. Помимо ручного отбора проб, мониторинг также осуществляется с использованием автоматической станции контроля загрязнения воды, размещенной на юго-востоке Москвы (на выходе Москвы-реки за пределы города). На станции вода в непрерывном режиме поступает на анализаторы⁴.

К основным гидрологическим проблемам Москвы относят: нарушение гидрологического, температурного и ледового режима, засорение водных объектов, поступление в водные объекты большого количества ЗВ и другие проблемы [Болгов, Черногаева, 2020]. В отличие от водохранилищ с ненарушенными условиями формирования стока, урбанизированные водохранилища Московской агломерации изучены не столь систематически. Это усложняет задачу оценки формирования стока, поскольку агломерация характеризуется недостаточно развитой сетью гидрологических наблюдений, отсутствием систем мониторинга стока и диффузного загрязнения водных объектов, а также слабой развитостью информационно-моделирующих систем, которые позволяли бы управлять городской водной средой [Болгов, Черногаева, 2020].

В исследованиях Н.И. Коронкевича и коллег [Коронкевич, Мельник, 2015b] был изучен вклад урбанизации в изменения стока Москвы-реки. Были выявлены общие закономерности

¹ <https://cugms.ru/>

² <https://mosvodostok.ru/>

³ <https://www.mosvodokanal.ru/>

⁴ <https://mosecom.mos.ru/>

влияния урбанизированных ландшафтов на её сток: показано, что в результате урбанизации в начале XXI в. годовой сток Москвы-реки вырос почти на 10% по сравнению с нормой, а в летне-осенний период – на 27% [Коронкевич и др., 2019]. Рост площади урбанизированных ландшафтов на 1% на современном этапе приводит к аналогичному увеличению стока, а рост водонепроницаемых территорий в их составе на 1% – к увеличению стока на 2–3% [Коронкевич, Мельник, 2019]. В аспекте сезонного распределения стока Москвы-реки отмечается увеличение стока в зимнюю и летне-осеннюю межень по сравнению с нормой более чем в 2 и 3 раза соответственно. Объём весеннего половодья вырос менее чем на 10%, при этом его доля в годовом стоке снизилась в 1,4 раза [Коронкевич, Мельник, 2015а]. Негативное воздействие вод также заключается в периодическом затоплении городской территории при прохождении паводков и половодий. Оценка зон затопления в Московском регионе была дана в исследованиях [Терский и др., 2017, 2020].

Исследованием этих проблем занимается «городская гидрология», или «urban hydrology», которая определяется как междисциплинарная наука, изучающая взаимодействие между водными ресурсами и городской средой [Jones, 1971]. Это относительно молодая наука; основная часть знаний накоплена с начала 1960-х годов [Jens, McPherson, 1964; Weibel, Anderson, Woodward, 1964; McPherson, 1974]. Зарождение городской гидрологии относится к периоду, когда автомобильный транспорт стал основным средством передвижения в США. Дороги были заасфальтированы, чтобы облегчить передвижение по растущим пригородам, в результате чего быстро образовывались большие водонепроницаемые участки, приводящие к заметным проблемам с водоотведением. Эти изменения настолько фундаментальны, что «городская гидрология» была признана отдельной дисциплиной, необходимой для понимания и управления данными процессами [Lazaro, 1979; Akan, Houghtalen, 2003]. Более того, многочисленные исследования продолжают демонстрировать удивительно последовательную трансформацию гидрологического режима, происходящую в результате развития городов [White, Greer, 2006; Olivera, DeFee, 2007]. Данная дисциплина включает в себя комплексный анализ того, как городские ландшафты и инфраструктура влияют на водный цикл, в том числе динамику поверхностного стока, качество водных объектов и стратегии управления водными ресурсами в городских условиях.

Российская научная школа имеет богатую историю исследований в области городской гидрологии. В отечественной практике значимый вклад в её развитие был сделан Глушковым В.Г. [Глушков, 1961], предложившим ввести направление «искусственной гидрологии», которая должна освещать обширный круг вопросов, связанных с гидрологическими последствиями хозяйственной деятельности на водосборах и в русловой сети. Позднее развитием антропогенного направления в гидрологии занимались такие учёные, как Львович

М.И., Куприянов В.В., Шикломанов И.В., Никаноров А.М. и многие другие [Коронкевич и др., 2017].

В настоящее время существует значительный разрыв между практикой и теорией гидрологических расчётов в вопросах градостроительства и решения задач, связанных с ростом городов. Расчёты, выполняемые при проектировании систем водоснабжения, отвода отработанных вод и их обезвреживания, основываются на теории гидрологических процессов применительно к естественным условиям. В основном они не учитывают изменений гидрологического цикла, вносимых урбанизацией – процессом роста численности городского населения и расширения городских территорий, приводящим к увеличению значения городов в социальной, экономической и культурной жизни общества. Отсутствуют разработанные методы генетического анализа структуры водного баланса урбанизированной территории и её изменений во времени [Куприянов, 1977].

В большинстве водохозяйственных расчётов не учитывается хозяйственная деятельность на водосборах по причине неоднозначности её оценки, неопределённого влияния отдельных её видов на сток рек и других расхождений [Коронкевич и др., 2019]. Изначально роль урбанизации с гидрологической точки зрения рассматривалась в основном через призму водопотребления и гидротехнического строительства в населённых пунктах, и лишь сравнительно недавно исследователи обратили внимание на стремительное увеличение водонепроницаемых поверхностей и связанное с этим снижение потерь стока и увеличение его коэффициента [Коронкевич, Мельник, 2017]. Первое крупное обобщение воздействия урбанизированных ландшафтов на сток рек, в котором учитывался как отечественный, так и зарубежный опыт, было выполнено Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) в конце 1970-х годов [Куприянов, 1977]. Особое место в городской гидрологии в России занимают работы Института географии Российской академии наук (далее – ИГ РАН) [Коронкевич и др., 2017; Коронкевич и др., 2019 и др.].

Проблемы, выделенные в области городской гидрологии, тесно связаны с аспектами конструктивной географии, сформулированными Герасимовым И.П. в 1980-х гг. В своих трудах [Герасимов, Преображенский, 1986, с. 74] авторы писали:

«...Если под влиянием земледелия речной сток преимущественно уменьшается, то в результате роста городских территорий, площадей, занимаемых дорогами и другими уплотнёнными поверхностями, происходит увеличение поверхностного и полного речного стока. Однако такое увеличение нельзя признать положительным, поскольку воды, стекающие с урбанизированных площадей, как правило, очень загрязнены...».

Современный этап (с 70-х гг. XX в.) развития исследований в области гидрологии городов характеризуется значительным количеством работ, посвящённых изучению реакции

стока на увеличение площади урбанизированных территорий [Куприянов, 1977; Львович, Черногаева, 1978; Львович, Чернышев, 1983; Устюжанин, 1989 и др.]. Высокоурбанизированные водосборы, часто называемые городскими водосборами, представляют собой территории, в землепользовании которых произошли значительные изменения в результате городского развития [Lawler et al., 2006; Barałkiewicz et al., 2014; Miller, Hutchins, 2017]. В отличие от больших водосборов наиболее существенные изменения под влиянием урбанизации претерпевают малые и средние речные бассейны [Praskiewicz, Chang, 2011].

Очевидно, что изучение городской гидрологии особо актуально, учитывая значительные масштабы изменения окружающей среды под влиянием деятельности человека. Однако без понимания аспектов традиционной гидрологии, в том числе без знания естественных процессов, трудно объяснить и предугадать возможные последствия антропогенной деятельности. Несмотря на значимость этой темы, комплексные исследования гидрологического режима рек Московской агломерации в условиях интенсивной урбанизации остаются относительно редкими. Большинство исследований, посвящённых изучению водных объектов агломерации, фокусируются преимущественно на общем состоянии Москвы-реки, в то время как малые притоки, которые играют важную роль в формировании гидрологического режима, остаются недостаточно изученными. Несмотря на то что основные притоки Москвы-реки хорошо известны, их комплексные гидрологические исследования внутри городской черты практически отсутствуют. В контексте растущего антропогенного воздействия, которое влияет на все водные системы столицы, заполнение этого существенного пробела в изучении малых городских рек представляется важной исследовательской задачей.

1.1. Изменения климатических условий формирования стока в городской среде

В городах происходит нарушение естественного теплового и ветрового режима, а также загрязнение воздушного бассейна, вследствие чего изменяется температура воздуха, осадки и испарение, а также непосредственно гидрологический цикл. Между тем еще до 1950-х гг. в гидрологии доминировала климатологическая концепция формирования стока, согласно которой величина и водный режим рек определялись исключительно метеорологическими изменениями, при этом считалось, что состояние водосборной территории не оказывает существенного влияния [Львович, 1963; Коронкевич и др., 2019].

Изучение **изменений осадков**, вызванных городскими условиями, стало предметом активных исследований с 1970-х годов [Fletcher et al., 2013]. Ряд исследований был посвящён попыткам количественно оценить это влияние, сравнивая условия до урбанизации и после. По оценкам, сезонные изменения локально могут увеличивать количество осадков от 5 до 15%

[Huff, Changnon, 1972; Taha, 1997; Shepherd et al., 2002], однако эти результаты имеют высокую степень неопределённости из-за скудности гидрометеорологических данных и сложности количественного определения влияния других атмосферных процессов [Salvadore et al., 2015].

Особенности процессов формирования, интенсивности и продолжительности осадков в условиях Московской агломерации подробно были изучены в работах [Дмитриев, Бессонов, 1969; Стулов, 1993; Varentsov et al., 2018; Брусова и др., 2019; Ярынич и др., 2023]. Отмечается превышение сумм осадков в условиях города над суммами окружающей его территории, а также высокая повторяемость экстремальных осадков с интенсивностью более 50 мм в сутки. В исследовании [Chalov et al., 2023] также был выявлен положительный тренд вариабельности интенсивных осадков в Московском регионе с 1966 по 2021 г., способствующий формированию значительных паводков в отдельные годы (**Рисунок 1.1**). На территории Московской агломерации ливневые осадки являются ключевым механизмом поступления ЗВ в водные объекты за счёт интенсификации поверхностного смыва.

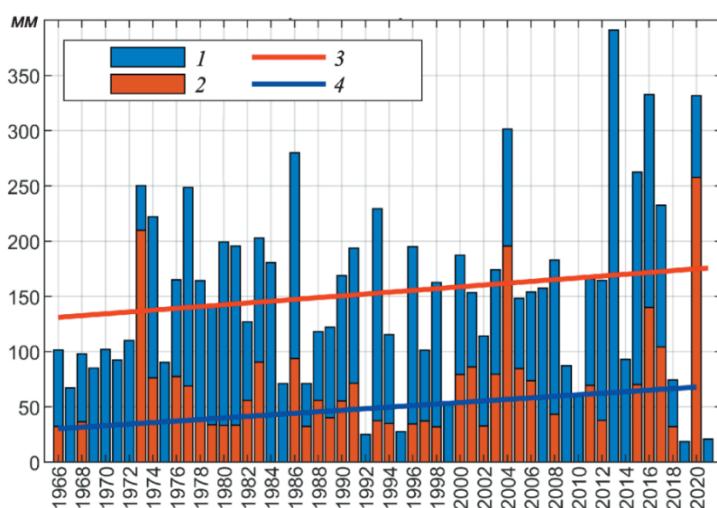


Рисунок 1.1. Многолетние ряды показателей годовой суммы осадков за дни с осадками > 95 -го перцентиля (1) и годовой суммы осадков за дни с осадками > 99 -го перцентиля (2) на метеостанции МГУ и их линии тренда соответственно: 3) $y = 0,81x - 1467,2$; 4) $y = 0,70x - 1344,4$ [Чалов и др., 2023а]

Рост застроенных территорий сопровождается увеличением площади покрытий из теплоёмких материалов (например, асфальт, бетон и др.), что приводит к повышению температуры воздуха в городских районах по сравнению с неурбанизированными территориями. Это явление известно как **«городской остров тепла»** – термическая аномалия, при которой температура в городе выше фоновой [Varentsov et al., 2019; Chubarova et al., 2022; Lokoshchenko, Alekseeva, 2023]. Формирование острова тепла связано с особенностями городской застройки: высокие здания увеличивают аэродинамическую шероховатость

поверхности и усиливают турбулентный обмен, а также создают эффект многократного переотражения света. Строительные материалы и застройка изменяют альбедо, радиационные характеристики, теплоёмкость и теплопроводность среды. Существенный вклад в формирование острова тепла вносят антропогенные тепловые потоки: прямой нагрев воздуха от зданий и теплосетей и выбросы тепла от систем кондиционирования, особенно в тёплое время года. Дополнительное воздействие оказывают выбросы газов и аэрозолей, которые изменяют оптические свойства атмосферы и радиационный баланс города [Кислов, 2017].

Эффект городского острова тепла может способствовать увеличению количества осадков над городом за счёт усиления конвективных процессов, способствующих образованию облаков и увеличению интенсивности локальных осадков. Исследование [Shepherd, Burian, 2003], основанное на данных спутниковых наблюдений, демонстрирует заметные аномалии осадков над крупными прибрежными городами (Хьюстон, Техас), что подтверждает первостепенное значение влияния городского острова тепла на количество и распределение осадков. Между тем, сжигание топлива на заводах и в транспортных средствах, а также жизнедеятельность людей в городах способствуют выбросу в атмосферу множества мелких частиц, что приводит к высокому уровню загрязнения, известному как феномен «**городского острова загрязнения**» [Kasimov et al., 2024]. Эти два явления представляют собой серьёзную проблему для городской среды в связи с быстрой урбанизацией. Они должны изучаться одновременно, так как способны взаимодействовать друг с другом: сокращение выбросов ЗВ способствует уменьшению антропогенной тепловой эмиссии, вносящей вклад в городской остров тепла [Li et al., 2018].

Исследования, проведённые на примере Москвы, показывают, что средняя за год интенсивность поверхностного острова тепла (разность температуры в городе и за его пределами) в Москве составляет около 2,6 °C [Сорокина, Локощенко, 2021]. При этом максимально возможная интенсивность острова тепла в Москве может составить более 10 °C, вплоть до 14 °C, обычно ночью или ранним утром [Lokoshchenko, 2014]. Одновременно повышение концентрации аэрозолей и мелких частиц, характерное для городского острова загрязнения, способствует увеличению числа ядер конденсации, что, в свою очередь, изменяет формирование облаков и характер выпадения осадков. В результате наблюдается возрастание частоты сильных ливней и перераспределение осадков, при этом экстремальные осадки могут увеличиваться на 11,6% по сравнению с фоновыми значениями в пригородных зонах [Ярынич и др., 2023].

Урбанизация может значительно влиять на **испарение**, точная оценка которого (испарения) имеет решающее значение, поскольку представляет собой основной компонент глобального водного баланса [Cheng et al., 2011]. Считается, что в городских водосборах

испарение значительно меньше, чем в неурбанизированных, ввиду отсутствия растительности. В мегаполисе Тяньцзинь (Китай) за период с 1986 по 2021 годы общее городское испарение снизилось примерно на 13% (около 1,41 мм/год) вследствие урбанизации, главным образом из-за сокращения испарения почвы и транспирации, вызванного уменьшением растительного покрова и увеличением площади непроницаемых поверхностей в результате застройки [Chen et al., 2022]. Однако в некоторых исследованиях описана обратная картина – испарение на территории города может достигать 40% в год, а в экстремальных случаях – 80% от общих потерь в летний период [Grimmond, Oke, 1991; Rodriguez et al., 2008]. Это связано с тем, что урбанизация сопровождается заменой естественного ландшафта на асфальт, бетон и кровли с низким альбедо (т.е. с низким коэффициентом отражения солнечного света), что способствует дополнительному нагреву и, как следствие, повышенному испарению и изменению теплового режима [Ouyang et al., 2022]. Упомянутый ранее эффект городского острова тепла, который характеризуется повышением температуры в городских центрах по сравнению с окрестностями, также будет увеличивать прямое испарение воды, хранящейся в поверхностных впадинах, растительном покрове, водоёмах. Кроме того, значительную роль играет искусственное орошение, например, в исследовании [Kokkonen et al., 2018] авторы сравнивали гидрологические циклы двух пригородных районов Ванкувера в период первоначального развития города и его последующего развития. Было выявлено, что орошение является доминирующим фактором, на который приходится до 56% годового водопотребления; при этом без орошения испарение за почти 100 лет уменьшилось бы на 1,4 мм/год, а сток увеличился бы на 4 мм/год с увеличением площади противофильтрационного покрытия.

1.2. Изменение подстилающей поверхности и режима землепользования в условиях городов и их влияние на гидрологические процессы

Степень воздействия урбанизации на водные ресурсы и водный сток определяется масштабами земельных площадей, которые отводятся под строительство объектов различного функционального назначения, включая транспортную инфраструктуру, промышленные зоны и жилые зоны, а также другие типы застройки. По мере освоения поверхности земли под городские нужды регион переходит из естественного состояния в полностью антропогенное – создаётся новый **антропогенный ландшафт** с городской и промышленной застройкой, преобразованными водными объектами и искусственно созданными природными комплексами. С начала XX в. площадь нарушенных территорий в мире увеличилась более чем в 3 раза [Короневич и др., 2019]. Новые строения добавляют к водосбору большое количество водонепроницаемых участков, которые в целом изменяют уклоны, нарушают естественную связь между поверхностными и подземными водами и значительно уменьшают инфильтрацию

[Куприянов, 1977; Lazaro, 1979]. Эти факторы определяют изменения гидрологического режима водных объектов на урбанизированной территории [Skougaard Kaspersen et al., 2017; Schliemann et al., 2021; Chiacchiera et al., 2022].

Нарушается водообмен между атмосферой, поверхностными и подземными водами. Это связано с тем, что в городах происходит замена естественных почвогрунтов культурным слоем грунта с новыми водно-физическими свойствами [Куприянов, 1977]. При наличии естественного почвенного покрова 25% дождевой воды просачивается в водоносный горизонт, и только 10% формирует поверхностный сток [Arnold, Gibbons, 1996]. В высокоурбанизированных районах более половины всех осадков превращается в поверхностный сток, а глубокая инфильтрация составляет лишь малую часть от естественной. По мере того как площадь непроницаемых покрытий приближается к 100%, инфильтрация будет стремиться к нулю (Рисунок 1.2).

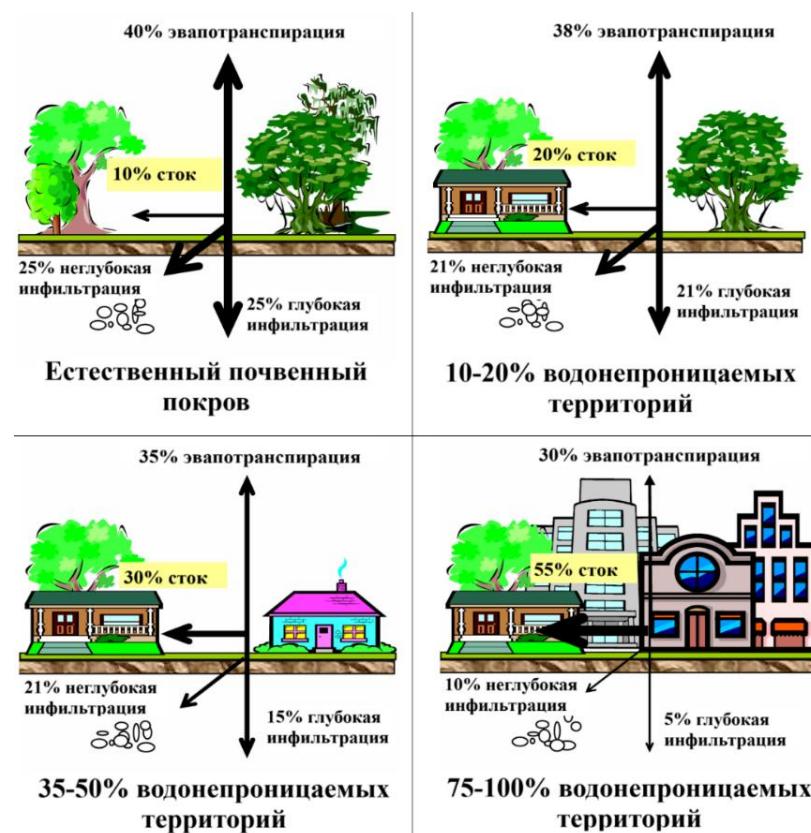


Рисунок 1.2. Влияние урбанизации на водный баланс городов

[Arnold, Gibbons, 1996]

В городах естественная гидрографическая сеть также преобразована за счёт дренажных и канализационных систем, обуславливающих быстрое поступление талых и дождевых вод в русловую сеть [Фролова, 2018]. Исследования отдельных водосборов показали увеличение общего количества стока и частоты наводнений; изменение формы гидрографов, в частности уменьшение времени до пика и увеличение пикового расхода; а также часто общее снижение

базисного стока [Hollis, 1974, 1975]. Рост водонепроницаемых покрытий в пределах водосбора является простым, но очень эффективным предиктором изменений характеристик водного стока в результате урбанизации [Akan, Houghtalen, 2003; Gurnell et al., 2007].

Рост площади непроницаемых поверхностей является ключевым фактором нарушения естественного гидрологического цикла. По данным исследования, проведенного в регионе Метро-Ванкувер (Канада), с 1990 по 2015 год площадь непроницаемых поверхностей увеличилась на 31,96%. При этом авторы отмечают, что такое увеличение привело к существенному росту объёмов поверхностного стока и увеличению площади затопления при экстремальных осадках. В частности, площадь, затапливаемая слоем воды не менее 5 см, увеличилась на 51% [Hamilton et al., 2021].

Создание непроницаемых поверхностей оказывает существенное влияние на годовой сток рек и на его внутригодовое распределение. Расширение городских земель вызывает значительные изменения в естественных процессах инфильтрации из-за увеличения площади асфальтированных поверхностей, что обуславливает рост поверхностного стока, и, в конечном итоге, приводит к увеличению риска наводнений [Gurnell et al., 2007]. Наряду с увеличением коэффициента стока из-за уменьшения инфильтрации и ускорения стекания талых и дождевых вод, годовой сток с урбанизированных территорий в среднем на 10–20% превышает сток в естественных условиях [Янин, 2006; McGrane, 2016]. Согласно [Коронкевич и др., 2022] рост урбанизированных территорий на современном этапе обусловил увеличение мирового годового стока примерно на 760 км³/год (глобальный среднегодовой речной сток увеличился на 1,3–1,4%). В наиболее густонаселенных регионах Европы, Азии и Северной Америки прибавка достигает около 7%, а в отдельных бассейнах – до 10–20% (например, pp. Москва, Темза, Сена, Шпрее) [Коронкевич, Мельник, 2019].

Существуют некоторые региональные различия – в регионах, где речной сток формируется преимущественно ливневыми осадками, увеличение годового стока с урбанизированной территории может достигать около 100–200% [Куприянов, 1977], однако в случаях отведения использованных вод или вывоза снега за пределы города, годовой сток может существенно снижаться [Eimers, McDonald, 2015; McGrane, 2016]. Более того, водный баланс городских водотоков определяется не только спецификой ландшафта, но и структурой водопотребления и водоотведения – сток большинства городских малых рек формируется преимущественно за счёт постоянного поступления в них сточных вод или загрязнённого поверхностного стока в течение года, что является причиной внутригодового выравнивания речного стока. В свою очередь тепловое загрязнение, в частности за счёт поступления тёплых сточных вод, может оказывать воздействие на термический и ледовый режим городских водных объектов.

Характер весеннего половодья в крупных агломерациях может слабо зависеть от снегозапасов и условий предшествующей зимы. В районах, где снег вывозится за пределы города, весенне полноводье может быть менее выраженным или сдвинутым во времени [Фролова, 2018]. Это может привести к изменению внутригодового распределения стока, когда основной сток происходит не в традиционные весенние месяцы, а в другие периоды года. В исследовании [Pang et al., 2022] городских водосборов Южной Финляндии обнаружено, что снежный покров сокращается и таяние снега происходит раньше, а количество талого стока уменьшается при различных климатических сценариях. При этом доминирующая часть городского стока смещается с лета на осень.

Эффект городского острова тепла и загрязнение снежного покрова существенно сокращают период снегонакопления и интенсифицируют процесс снеготаяния, укорачивая период половодья. Городские и промышленные загрязнения (пыль и аэрозоли) могут распространяться далеко за пределы города, оседая на снежном покрове, вследствие чего его альbedo значительно ниже, чем на незагрязнённых территориях [Куприянов, 1977]. Снижение альbedo из-за загрязнений и городской структуры приводит к более раннему и интенсивному таянию снега, что увеличивает зимний и ранневесенний поверхностный сток, а также меняет временные характеристики половодья [Järvi et al., 2017]. Большинство современных исследований снежного покрова в городских условиях сосредоточено на проблемах загрязнения снега и его воздействии на качество городской среды. Вместе с тем, влияние вывоза снега за пределы города на поверхностный сток, особенно малых городских рек, а также сдвиг фаз водного режима (далее – ФВР) остаётся значительно менее изученным аспектом городской гидрологии.

В работе [Bengtsson, Westerström, 1992] проведён сравнительный анализ процесса таяния снега и стока воды в городских и сельских районах Швеции. На примере центра г. Лулёо в марте 1979 г. ($800,000 \text{ м}^2$) выявлена значительная неравномерность снежного покрова. Объём снега в центре города был оценён примерно в $50,000 \text{ м}^3$ водного эквивалента. При этом 83% территории было свободно от снежного покрова, 11% занимали снежные валы, а около 6% – почти нетронутый снег. За счёт увеличенного поглощения радиационной энергии снег в городе тает быстрее – дневной объём таяния в городе примерно на 10 мм больше, чем в сельской местности. Интенсивность талого стока ниже, чем дождевого, однако он продолжается значительно дольше, и при этом в процесс вовлечена большая площадь водосбора.

Процессы формирования **максимального стока** в городе значительно отличаются от процессов на естественных водосборах, а методики расчёта изменяются от балансовых и статистических к гидродинамическим [Терский и др., 2020]. Гидрологический эффект урбанизации наиболее значим в тёплый период, когда наблюдается существенная разница в

коэффициентах стока с естественных и урбанизированных территорий – усиливаются летние паводки и наводнения [Короневич и др., 2019]. Из-за увеличения скоростей стекания и повышения стока с малопроницаемых дорожных покрытий и крыш средние максимальные расходы могут увеличиваться в 3–8 раз [Фролова, 2018]. Трансформация водосбора приводит к уменьшению времени добегания паводкового стока и сокращению продолжительности паводков (**Рисунок 1.3**), а организация коллекторов ливневой канализации обуславливает увеличение повторяемости и высоты паводков [Куприянов, 1977; Skougaard Kaspersen et al., 2017; Соколов и др., 2021]. Специфика планировки рельефа и дорожные насыпи, выступающие в роли локальных водоразделов, могут создавать и обратный эффект, связанный с увеличением времени добегания стока с водосбора [Чалов и др., 2023а].

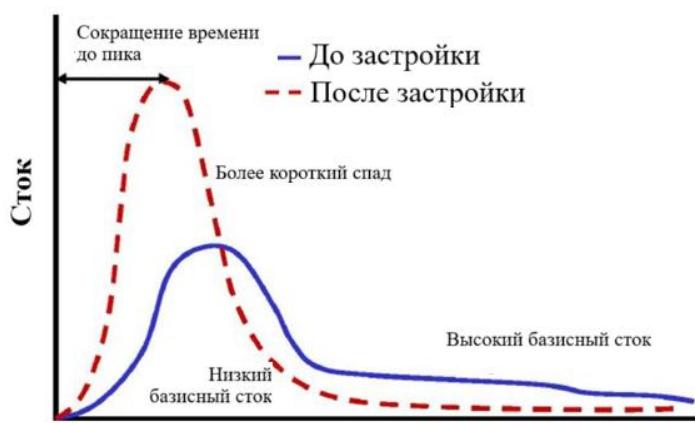


Рисунок 1.3. Влияние застройки на прохождение паводков [Liu et al., 2014]

В результате урбанизации возрастает соотношение между количеством осадков и объёмом стока в реках, а также существенно увеличиваются пиковые расходы воды [O'Driscoll et al., 2010]. Было выявлено, что пиковый сток на реках США после развития урбанизации стал на 400% выше, чем до застройки [Moglen et al., 2004]. В работе [Zhao et al., 2016] было проведено тематическое исследование бассейна р. Сан-Антонио в штате Техас, имеющего площадь около 10,800 км². Реализация распределённой гидрологической модели почвенно-растительного покрова позволила увеличение максимального годового стока с 601 до 885 м³/с за счёт роста городских водонепроницаемых территорий. Интересные результаты были получены в исследовании [Habineza, Ndokoye, 2025], где было выявлено, что изменения в землепользовании в бассейне р. Ньябаронго (Руанда), связанные с урбанизацией, привели к ежегодному сокращению площади пастбищ на 6,79% с соответствующим увеличением сельскохозяйственных земель на 9,1% и застроенных территорий на 12,73%. Результаты моделирования продемонстрировали среднегодовое увеличение пикового расхода на 1,61%, при этом коэффициент корреляции составил 0,84 между изменениями в землепользовании и речным стоком.

Меженний сток внутри урбанизированной территории может как снижаться, так и повышаться за счёт источников и системы водопользования [Куприянов, 1977]. Объём меженного стока особенно зависит от конфигурации инженерных систем, в том числе наличия водохранилищ, канализации и других гидротехнических сооружений, которые могут перераспределять базисный сток. В настоящей работе эти аспекты более подробно будут раскрыты в **Разделе 1.3**.

1.3. Влияние водопользования и водоотведения на режим городских рек

В крупных городах структура водоснабжения существенно различается по доле использования подземных и поверхностных источников (**Таблица 1.1**). В ряде мегаполисов, таких как Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Екатеринбург, Лондон и Берлин, 74–97% воды поступает из поверхностных источников – это связано с высокой техногенной нагрузкой и сложным гидрогеохимическим режимом городских подземных вод. В Московской области централизованное водоснабжение, напротив, осуществляется преимущественно из подземных горизонтов, что обусловлено наличием развитых водоносных систем. Для таких городов, как Париж и Мехико, доля подземных источников составляет 59–72%. В отдельных регионах (например, Дели) подземные воды участвуют в водоснабжении лишь на 9% из-за их ограниченности и загрязнённости. В Пекине, вследствие истощения подземных горизонтов, две трети воды приходится на поверхностные источники, включая переброску стока из других районов страны.

Таблица 1.1

Сравнительная характеристика доли подземных и поверхностных источников водоснабжения

Город	Подземные воды, %	Поверхностные воды, %	Источник
Москва	12	88	Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Московской области и г. Москвы на 15.06.2020 г. ⁵
Московская обл.	86	14	
Санкт-Петербург	6,7	93,3	Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы г. Санкт-Петербург на 15.03.2021 г. ⁶
Новосибирск	2,3	97,7	Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Новосибирской области (на 15.06.2020 г.) ⁷

⁵ <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/1938aff61b79e60905f1fa605d1b081c.pdf>

⁶ <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/8f9e34e95abbee24e4bbcf59e3c86448.pdf>

⁷ <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/b15fadfc597ef52790a0fa4c3f9e076.pdf>

Город	Подземные воды, %	Поверхностные воды, %	Источник
Екатеринбург	6,5	93,5	Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Свердловской области (на 15.06.2020) ⁸
Париж	59	41	[Barraqué et al., 2010]
Лондон	20	80	Final Water Resources Management Plan 2019 ⁹
Берлин	26	74	[Pohle et al., 2024]
Дели	9	91	[Parveen, Ahmad, 2024]
Мехико	72	28	[Palma Nava et al., 2022]
Пекин	33	67	[Gao et al., 2023]

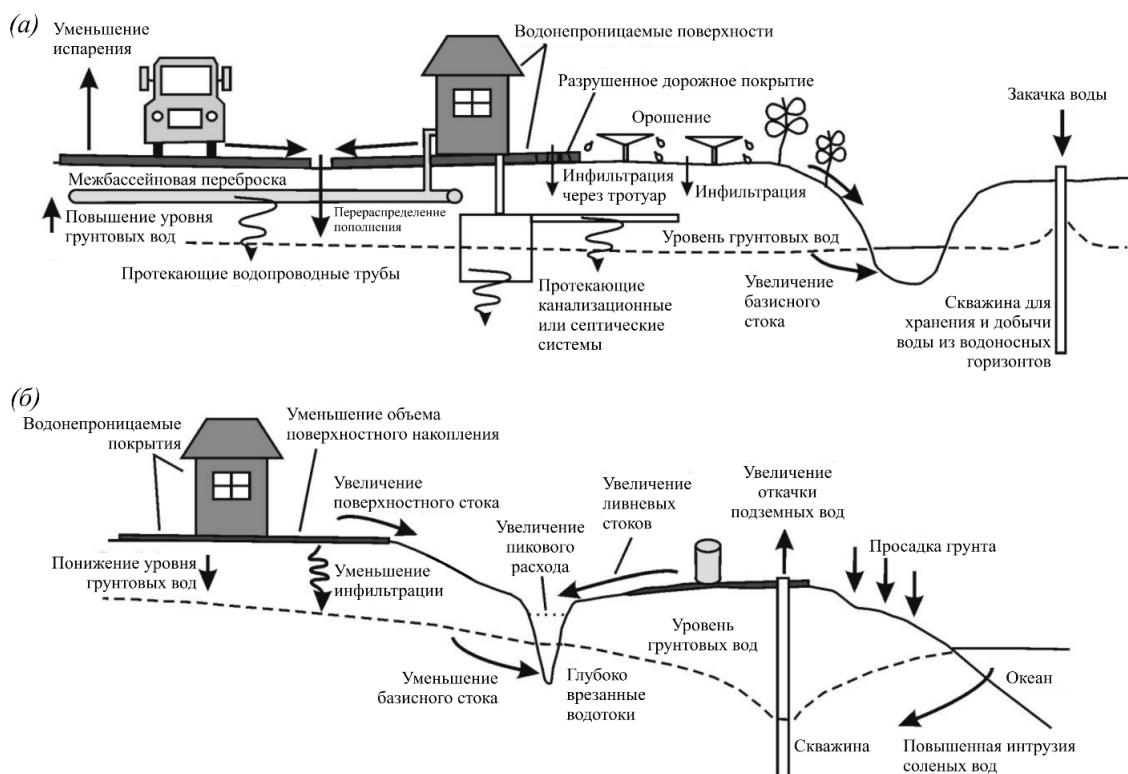


Рисунок 1.4. (а) Факторы, которые могут способствовать увеличению пополнения подземных вод и/или увеличению базисного стока в городских условиях. (б) Факторы, которые могут способствовать снижению пополнения подземных вод и/или уменьшению базисного стока в городских условиях [Welty et al., 2007; O'Driscoll et al., 2010]

Активное водопользование и развитие систем водоотведения в крупных городах существенно изменяют гидрологический режим городских рек и естественное пополнение подземных вод [Garcia-Fresca, Sharp, 2005] (Рисунок 1.4). Часто предполагается, что урбанизация снижает **пополнение грунтовых вод**, поскольку естественные механизмы

⁸ <https://rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202011/d0e663756fc455b1a4b22a5906177f33.pdf>

⁹ <https://www.thameswater.co.uk/media-library/bktpvyat/current-and-future-water-supply.pdf>

пополнения заменяются новыми, которые определяются следующими факторами [Foster, 1990]: увеличивается количество водонепроницаемых покрытий, уменьшающих инфильтрацию, и, следовательно, прямое пополнение, что приводит к истощению ресурсов подземных вод. Вместе с тем, современные исследования отмечают и обратные явления – рост пополнения подземных вод за счёт утечек из водопроводных сетей [Lerner, 2002].

В работе [Salvadore et al., 2015] выделено 3 основных механизма антропогенного воздействия: снижение инфильтрации вследствие увеличения водонепроницаемых поверхностей; косвенное пополнение в результате утечек из водопроводных и канализационных сетей; а также изменение режима извлечения и сброса подземных вод. Проницаемость почвенного покрова в городах обычно низкая, часто близка к нулю, что дополнительно препятствует пополнению грунтовых вод и, как следствие, обуславливает падение их уровня и запасов. Тем не менее, существуют факторы, которые способны увеличивать прямое пополнение – это избыточное орошение зелёных насаждений, снижение суммарного испарения и наличие систем инфильтрации ливневых вод, перенаправляющих часть поверхностного стока.

Нерациональная добыча подземных вод также остаётся актуальной проблемой – часто спрос на воду для обеспечения населения превышает скорость естественного пополнения запасов грунтовых вод. Яркий пример – ситуация в Кабуле (Афганистан), где за последние десять лет уровень водоносных горизонтов снизился на 25–30 метров, а объёмы ежегодного отбора воды превышают её естественное восстановление примерно на 44 млн м³ [Mercy Corps, 2025]. По прогнозам международных организаций, если текущие тенденции сохранятся, уже к 2030 г. город может полностью лишиться запасов подземных вод. В восточном Китае, согласно исследованию [Liu et al., 2001], добыча превышала пополнение в 1,5 раза, что вызвало нехватку воды для сельского хозяйства, снижение уровня грунтовых вод в водоносных горизонтах, интрузию солёных вод, проседание почвы и ухудшение качества подземных вод. Ещё одним показательным примером антропогенного влияния служит ситуация в Хошимине (Вьетнам). Здесь с 1995 по 2012 г. изъятие подземных вод выросло в 6 раз, что привело к заметному снижению их уровня, сокращению естественного подземного стока и одновременному увеличению утечек из рек в грунтовые воды. В результате активной эксплуатации подземных вод утечки из реки увеличились в 4 раза, тогда как сброс подземных вод в реку за тот же период сократился на 35% [Ha, Koontanakulvong, 2024].

Водораспределение в городах осуществляется под давлением, что повышает **риск утечек** в местах повреждений и, как следствие, увеличивает подпитку подземных вод. Согласно ряду исследований [Lerner, 2002; Garcia-Fresca, Sharp, 2005], лишь немногие страны мира могут утверждать о сокращении утечек из систем водоснабжения до <10%, в то время как для

развитых стран этот показатель составляет 20–30%, а для развивающихся – 30–60%. Особую роль этот фактор играет в засушливых регионах, где утечки могут быть выше естественного пополнения [Salvadore et al., 2015]. Повышение уровня грунтовых вод в некоторых случаях увеличивает риск разрушения фундамента, возникновения оползней и сейсмической опасности, а также может привести к засолению почвы за счёт испарения и растворения, снижая прочность и увеличивая риск разрушения конструкций [Etikala et al., 2022].

В среднем по Москве потери воды через поврежденные подземные коммуникации составляют примерно 3,8–4,2% от объёмов, проходящих по канализационным коллекторам. На промышленных территориях и в старых жилых районах эта величина существенно выше и может достигать 15%. Такие утечки способствуют увеличению подземного стока, вследствие чего более 40% Москвы уже подтоплено, а уровень грунтовых вод ежегодно поднимается на 5–40 см [Лебедева, Михалёв, 2011]. Ещё одной проблемой для Московского региона является строительство обгонных коллекторов вдоль рек – они предназначены для отвода поверхностного стока из верхних частей водосборов. Часто предполагается, что они пропускают только поверхностные воды, оставляя подземный сток в естественном русле. Однако железобетонные трубы не являются полностью герметичными – вода проникает через стыки и неплотности, поэтому в коллектор попадает почти весь сток с прилегающей территории, а русло реки остаётся почти сухим. При этом такие коллекторы создают сопротивление для подземных вод и могут вызывать заторы и подтопления, в том числе подвалов зданий [Орлов и др., 2014].

В ходе многовековой застройки и благоустройства Москвы исчезло значительное количество естественных водных объектов: порядка 700 озёр, болот и прудов, а также более 100 малых рек и ручьёв, что привело к выраженному нарушению естественного режима грунтовых вод города. Ликвидация овражно-балочной системы в речных долинах и образование мощных слоёв техногенных грунтов способствовали формированию искусственных накопителей подземных вод, что создало условия для развития процессов подтопления. Техногенные преобразования городской среды также повысили риск проявлений карста, из-за чего в конце XX в. фиксировались случаи разрушения жилых домов вследствие провалов поверхности и деформации грунта [Анисимова и др., 2002].

Активное освоение подземного пространства, особенно в центральных районах Москвы, приводит к значительным гидрогеологическим изменениям. Во многих местах здания и сооружения строятся ниже уровня грунтовых вод, что создает искусственные барьеры и способствует подтоплению прилегающих территорий. Чем выше уровень грунтовых вод, тем сильнее проявляются вторичные процессы, включая коррозию оснований зданий, что значительно повышает риски для городской инфраструктуры. Ситуацию усугубляет химически

загрязнённый состав грунтовых вод, ускоряющий разрушение строительных конструкций [Аникеев и др., 2020]. Обобщая вышеперечисленные проблемы, можно сделать вывод о том, что для крупных мегаполисов характерно значительное разнообразие геологических условий, приводящее к неоднородности проявления опасных процессов на разных участках городской территории. Оценка и анализ таких процессов требует комплексного подхода, поскольку их масштабы и параметры зачастую определяются локальными факторами и существенно отличаются от ситуации на остальных частях города.

1.4. Воздействие на русловые процессы и транспорт наносов

На урбанизированных территориях **русловые процессы** развиваются в специфических условиях, отличающихся от естественных. Основными факторами, определяющими специфику таких процессов, являются: изменение характера поверхностного стока вследствие плотной застройки, регулирование стока гидроузлами и плотинами, искусственные преобразования русел, их долин и продольного профиля, изменение режима поступления и баланса наносов.

В крупных городских агломерациях часто возводят гидроэлектростанции, регулирующие сток рек и замедляющие транспорт наносов, что приводит к нарушению естественного баланса русловых явлений, деформациям и изменению конфигурации поперечного сечения русел в пределах города. Для крупных городов характерно регулирование стока низконапорными плотинами. В таких условиях режим переноса наносов и масштабы русловых изменений в значительной степени зависят от поступления твёрдого стока с городской территории, при том, что берега реки в основном защищены набережными. Дополнительным следствием шлюзования является разделение реки на изолированные бьефы, которые постепенно заливаются наносами, поступающими из урбанизированной зоны [Беркович и др., 2000]. Характерный пример кардинального преобразования речного русла демонстрирует Москва-река в городской черте, которая зарегулирована системой плотин, практически полностью заключена в гранитные и бетонные набережные и фактически функционирует как протяжённое русло водохранлище [Зорина и др., 2010].

Рост урбанизированных территорий приводит к значительным **изменениям** в гидрографической сети, **морфологии русел**, берегов и пойменных участков водных объектов. При дефиците баланса наносов проявляются однонаправленные деформации, формируется некомпенсируемая русловая эрозия. Одновременно в городах усиливаются процессы **береговой эрозии**, особенно заметные в тех зонах, где русло сложено трудноразмываемыми коренными породами: в этом случае восполнение дефицита наносов происходит не за счёт донных размывов, а за счёт разрушения берегов, если те сложены рыхлыми грунтами [Беркович и др., 2000].

В черте города, как правило, происходит спрямление русел рек (Рисунок 1.5), укрепление берегов, создание каменных набережных и пр. [Куприянов, 1977]. Малые реки и ручьи в городах также подвергаются спрямлению, канализации, засыпке грунтом или полностью/частично заключаются в подземные коллекторы [Макаревич, Яротов, 2019]. Такие модификации русла меняют поперечный профиль водотока: происходит сужение либо расширение или углубление русла, что особенно проявляется в период паводков, когда размывается дно, подмываются и обрушаются берега, увеличивается крутизна откосов и расширяется русловая зона. Быстрое прохождение паводковых вод приводит к значительной реакции русла в нижележащих участках и увеличению риска наводнений [Todd-Burley et al., 2021]. Например, в Токийской агломерации с 1909 по 2020 г. доля спрямлённых участков русел выросла с 10% до более 40% всей речной сети, в результате чего длина русел существенно сократилась, а уклон увеличился, что привело к ускорению стока и увеличению риска наводнений [Itsukushima, Ohtsuki, 2021].

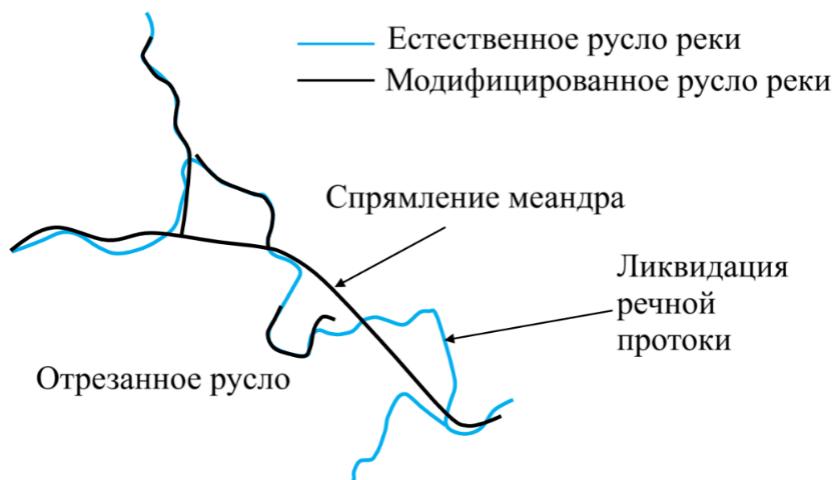


Рисунок 1.5. Схематическое изображение (диаграмма) примера модификации русла
[Itsukushima, Ohtsuki, 2021]

Эрозионные процессы в городской среде обычно проходят через несколько стадий. В период активного строительства и проведения дорожных работ происходит выравнивание рельефа, засыпка оврагов и верхних частей речной сети техногенными грунтами, нарушение естественного почвенного покрова и растительности, вследствие чего резко увеличивается сток наносов и изменяются продольные профили водотоков [Лебедева, Михалёв, 2011]. По данным различных исследований, сток наносов в период активного строительства может возрастать в 10–100 раз по сравнению с естественными условиями.

После завершения строительства твёрдый сток уменьшается по причине закрепления грунта покрытиями различного характера, в том числе за счёт уплотнения поверхности водосбора эрозионностойкими материалами и повсеместного укрепления берегов и дна русла,

что снижает интенсивность поверхностной эрозии [Gurnell et al., 2007]. Однако там, где русла не укреплены, русловая эрозия может стать важным источником наносов для городских рек. К примеру, в исследовании [Douglas, 1996] малых рек Юго-Восточной Азии сток наносов увеличился в 40 раз в процессе урбанизации, тогда как в работе [Liquete et al., 2009] была выявлена отрицательная динамика стока наносов ввиду уменьшения поверхностного смыва из-за асфальтирования подстилающей поверхности.

Согласно классификации, предложенной в [Ковалёв, Чалов, 2021], Москва относится к городам, подавляющим эрозионный рельеф, в процессе роста которых не учитываются особенности рельефа, а строительство при этом сопровождается полным преобразованием территории под нужды застройки. С 1860 по 1990 год общее количество оврагов в Москве уменьшилось примерно в 8 раз – с 800 до 106 [Никольская, Прохорова, 2011].

В последней четверти XX в. изменился подход к взаимодействию рельефа и жилой застройки – в новых районах на юго-западе Москвы (например, Ясенево, Тропарево) застройка стала учитывать природные особенности ландшафта, сохраняя лесопарковые зоны и практически нетронутые речные и овражные системы, где эрозионные процессы протекают в естественных условиях. Тем не менее, в ряде мест неправильное управление стоком дождевых и талых вод вызывает усиление существующей эрозии и появление новых оврагов [Зорина и др., 2020].

Городские территории, характеризующиеся значительной долей твердых покрытий, существенно влияют на формирование речного стока, особенно поверхностного, а также на **режим стока речных наносов**. Его преобразование в результате городского развития сопровождается изменением поступления и переноса наносов. В ходе урбанизации возможное количество традиционных источников наносов сокращается. Это происходит прежде всего из-за увеличения доли водонепроницаемых поверхностей, которые ограничивают процессы почвенной эрозии, характерные для сельскохозяйственных и природных территорий. Наряду с этим увеличивается вклад источников, обусловленных эрозионными процессами непосредственно в русле реки, на её берегах и пойме [Russell et al., 2016; MacKenzie et al., 2022].

Например, в случае бассейна р. Анакостия с площадью водосбора 188 км² (США, Мэриленд), как показал анализ источников твёрдых наносов, их вклад от уличного смыва и склоновой эрозии составил 13% и 30% соответственно, но ключевой источник – размыв берегов – обеспечил в среднем 58% всего поступления взвешенных частиц в реку за счёт активизации береговой и русловой эрозии [Devereux et al., 2010].

Особенно остро проявляются эти процессы в малых реках, протекающих по урбанизированным территориям, где их небольшие размеры по сравнению с масштабами городской застройки обуславливают высокую степень заиления и повышенную концентрацию

взвешенных частиц. Увеличение твёрдого стока здесь связано с нарушением поверхностного слоя в ходе строительных и дорожных работ, увеличением поверхностного смыва, поступлением загрязнённых хозяйствственно-бытовых и промышленных стоков, что приводит к формированию плотных, малоподвижных донных отложений и дополнительному ослаблению транспортной способности потока из-за параллельного изъятия речной воды для хозяйственных нужд [Беркович и др., 2000].

Сезонная динамика современного режима наносов в городах умеренного климата характеризуется значительным неравномерным распределением: в российских городах зимние показатели образования наносов примерно в 2,5 раза превышают летние значения, что обусловлено интенсивным снеготаянием и абразивным воздействием шипованных шин на дорожное покрытие. В период весеннего половодья наблюдаются максимальные концентрации взвешенных частиц в поверхностном стоке, связанные со смывом накопившихся за зиму твёрдых материалов. По итогам комплексных исследований, средний годовой уровень образования поверхностных наносов в жилых кварталах российских городов (на примере г. Екатеринбурга) достигает $1,2 \text{ кг}/\text{м}^2/\text{год}$, причём доля зимнего сезона составляет около 44% годового баланса – прежде всего за счёт интенсивного износа покрытий и шин на дорогах [Shevchenko et al., 2023].

Немаловажную роль играют техногенные факторы, которые приводят к изменению характера донных отложений и динамики русловых процессов. В настоящее время на обширных участках русла в городской черте доминируют **техногенные илы**, отличающиеся от естественного аллювия повышенной пластичностью и меньшей крупностью частиц. Подобные отложения простираются на протяжении нескольких километров в руслах рек, при этом мощность илистых отложений достигает 1–2 м и более. Их массовое поступление и аккумуляция в русле оказывает существенное влияние на развитие русловых процессов, приводя не только к формированию различных уникальных аккумулятивных форм, но и к нарушению естественной динамики русловых преобразований. Благодаря специфическим физико-химическим свойствам, обеспечивающим высокую устойчивость к размыву, техногенные илы способны сохраняться даже в участках с ускоренным течением [Янин, 2006].

Комплексное воздействие урбанизации на эрозионно-русловые системы можно систематизировать по характеру проявлений. Овражная эрозия на городских территориях характеризуется непосредственными последствиями в виде расчленения застроенных участков, повреждения инженерных коммуникаций и объектов инфраструктуры, а также несанкционированного использования эрозионных форм для размещения отходов и ЗВ. Опосредованные эффекты овражной эрозии проявляются через подтопление фундаментов зданий при нарушении поверхностного стока, активизацию оползневых процессов на склонах, а

также распространение загрязнений из оврагов в речную сеть и подземные воды [Зорина и др., 2010].

Русловые процессы в урбанизированной среде имеют прямое воздействие на разрушение берегоукрепительных сооружений, нарушение функционирования переправ и портовых комплексов, возникновение аварийных ситуаций на водных переходах транспортных коммуникаций. Косвенные проявления русловых процессов включают активизацию овражной эрозии на прилегающих склонах, особенно при подмыве их оснований, снижение пропускной способности русел вследствие накопления наносов, нарушение устойчивости прибрежных конструкций и формирование неблагоприятной морфологии дна для судоходства. Указанные процессы взаимно усиливают друг друга, создавая каскадные эффекты деградации городской гидрографической сети и повышения геоморфологических рисков для урбанизированных территорий [Зорина и др., 2010].

Все рассмотренные факторы воздействия на условия формирования режима поверхностных и подземных вод, а также стока наносов, могут быть представлены в виде характерных видов воздействия и их последствий (**Таблица 1.2**). Увеличение площади непроницаемых поверхностей, изменение климата, развитие систем водоснабжения и водоотведения, а также другие факторы городской среды существенно трансформируют режим стока, процессы эрозии и седimentации, взаимодействие поверхностных и подземных вод.

Для Московской агломерации, как крупнейшей в России, проблемы управления городским водным стоком стоят особенно остро. Несмотря на существование отдельных исследований в области изучения гидрологического режима рек Московской агломерации, малые реки Москвы испытывают многофакторное воздействие урбанизации, включая изменение режима стока, загрязнение, нарушение морфологии русла и береговой зоны и многие другие, при этом они остаются недостаточно изученными.

Таблица 1.2

Характерные формы изменения гидрологических условий городов

Категория воздействия	Основное содержание и ключевые факты	Примеры исследований
Влияние урбанизации на осадки	Урбанизация вызывает локальное увеличение осадков на 5–15%, хотя данные характеризуются высокой степенью неопределённости. Московские исследования фиксируют высокую повторяемость экстремальных осадков (>50 мм/сутки), рост интенсивности кратковременных осадков и положительные тренды вариабельности с 1966 по 2021 г. Эффект усиливается за счёт локальных конвективных процессов, обусловленных городским островом тепла.	[Huff, Changnon, 1972; Чалов и др., 2023a; Kasimov et al., 2024]
Эффекты «городского острова тепла» и «острова загрязнения»	Городской остров тепла (в Москве до +2,6°C в среднем, до +14 °C ночью) приводит к усиленной конвекции, облачности и увеличению осадков. Загрязнение аэрозолями увеличивает количество ядер конденсации, изменяет структуру осадков и увеличивает интенсивность ливней до 10–12%. Эти явления взаимосвязаны: снижение уровня загрязнений уменьшает тепловую эмиссию, влияя на эффект острова тепла.	[Lokoshchenko, 2014; Li et al., 2018; Chubarova et al., 2019; Сорокина, Локощенко, 2021; Kasimov et al., 2024]
Изменения испарения в урбанизированной среде	В городах наблюдается как снижение испарения ввиду отсутствия растительности, так и его повышение (до 40–80% летом). Низкое альbedo и остров тепла усиливают испарение с поверхности водоёмов и растительности. Искусственное орошение также может способствовать увеличению испарения.	[Grimmond, Oke, 1991; Kokkonen et al., 2018; Ouyang et al., 2022]
Изменение подстилающей поверхности и водного баланса	Рост площади водонепроницаемых покрытий ведет к снижению инфильтрации, увеличению поверхностного стока, нарушению связи между поверхностным и подземным стоком. Годовой сток с урбанизированных территорий возрастает на 10–15% и более, в отдельных случаях до 100–200%. Это увеличивает скорость дебегания поверхностных вод, частоту наводнений, изменяет форму и пики гидрографов.	[Lazaro, 1979; McGrane, 2016; Фролова, 2018; Коронкевич, Мельник, 2019; Hamilton et al., 2021]
Урбанизация и паводочный сток	Рост стока и пиковых расходов (до 3–8 раз), уменьшение времени до пика паводка, повышение частоты и высоты паводков, сокращение их продолжительности. Организация канализационных систем перераспределяет сток, увеличивает повторяемость паводков. В отдельных регионах пиковый сток вырос на 400% после урбанизации.	[Hollis, 1974; Moglen et al., 2004; Skougaard Kaspersen et al., 2017]

Категория воздействия	Основное содержание и ключевые факты	Примеры исследований
Влияние урбанизации на подземные воды	Подпитка подземных вод снижается из-за уменьшения инфильтрации, но утечки из поврежденных водопроводных сетей частично компенсируют этот дефицит, вызывая подтопления и повышение уровня грунтовых вод (в Москве – до 5–40 см ежегодно). Интенсивная добыча подземных вод ведет к уменьшению их запасов, ухудшению устойчивости грунта, интрузии солёных вод и другим негативным геолого-гидрологическим эффектам.	[Foster, 1990; Lerner, 2002; Лебедева, Михалёв, 2011; Ha, Koontanakulvong, 2024]
Таяние снега в условиях города и сток весеннего половодья	Загрязнение снега снижает альbedo, ускоряет таяние и увеличивает сток в ранний весенний период. Раннее таяние снега уменьшает продолжительность половодья. Вывоз снега уменьшает зимний и весенний сток, нивелирует весеннеев половодье и сдвигает период его прохождения.	[Bengtsson, Westerström, 1992; Järvi et al., 2017; Pang et al., 2022]
Русловые процессы и сток наносов	Урбанизация способствует спрямлению, укреплению берегов и уменьшению длины рек, что вызывает локализованные эрозионные процессы и ухудшает естественную динамику русла. Строительство и дорожные работы увеличивают сток наносов в 10–100 раз, после уплотнения поверхностей твёрдый сток стабилизируется. Техногенные илы (мощностью 1–2 м) меняют физико-химические свойства донных отложений, повышают их устойчивость к размыву и нарушают естественную динамику русла.	[Куприянов, 1977; Янин, 2006; Gurnell et al., 2007; Лебедева, Михалёв, 2011; Itsukushima, Ohtsuki, 2021; MacKenzie et al., 2022]
Деградация гидрографической сети	Массовое исчезновение естественных водных объектов: в Москве ликвидировано около 700 озёр, болот, прудов и более 100 малых рек и ручьёв. Ликвидация овражно-балочной сети и техногенные грунты создали искусственные накопители подземных вод. Обгонные коллекторы выводят сток из естественных русел, создавая осушенные участки и изменяя гидрографию.	[Анисимова и др., 2002; Орлов и др., 2014]
Геоэкологические риски и опасные процессы	Урбанизация активирует карстовые явления, деформации и проседания грунта, подтопление территорий (подъём уровня грунтовых вод до 40 см/год), искусственные барьеры в подземном пространстве, химическое загрязнение грунтовых вод ускоряет коррозию строительных конструкций и повышает риски для городской инфраструктуры.	[Анисимова и др., 2002; Лебедева, Михалёв, 2011; Аникеев и др., 2020]

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

2.1. Общие сведения о бассейне

Рассмотрение общих закономерностей формирования гидрологического режима рек в городах позволяет перейти к более детальному анализу специфики р. Сетунь, которая является объектом настоящего исследования. Её бассейн расположен в западной части города Москвы (Рисунок 2.1). Сетунь является крупнейшим правым притоком Москвы-реки в черте столицы, а также во всём её верхнем и среднем течении. Её длина составляет 38 км, а площадь водосбора – 190 км².



Рисунок 2.1. Бассейн р. Сетунь (1 – населённые пункты (>100,000 человек), 2 – водотоки, 3 – граница муниципальных образований, 4 – граница бассейна)

Исток реки находится у с. Румянцево Ленинского района Московской области. Сетунь протекает через городские районы Солнцево, Ново-Переделкино, частично в Одинцовском районе Московской области, пересекает МКАД в районе Сколковского шоссе, затем Аминьевское шоссе, Минскую улицу и впадает в Москву-реку ниже Бережковского моста, напротив Новодевичьего монастыря (Рисунок 2.2). Основные притоки – пр. Сетунька, Навершака и Раменка [Соколов и др., 2021]. Густота речной сети на водосборе р. Сетунь составляет 0,38 км/км². В пределах бассейна протяженность открытых русел рек 59,7 км, рек в коллекторах – 9,54 км, обгонных речных коллекторов (параллельно каскадам прудов) – 12,2 км.

Суммарная длина дождевых коллекторов (с диаметром не менее 400 мм) – около 170 км, т.е. протяженность искусственной дренажной сети почти втрое превышает естественную [Самохин, Чалов, 2009].

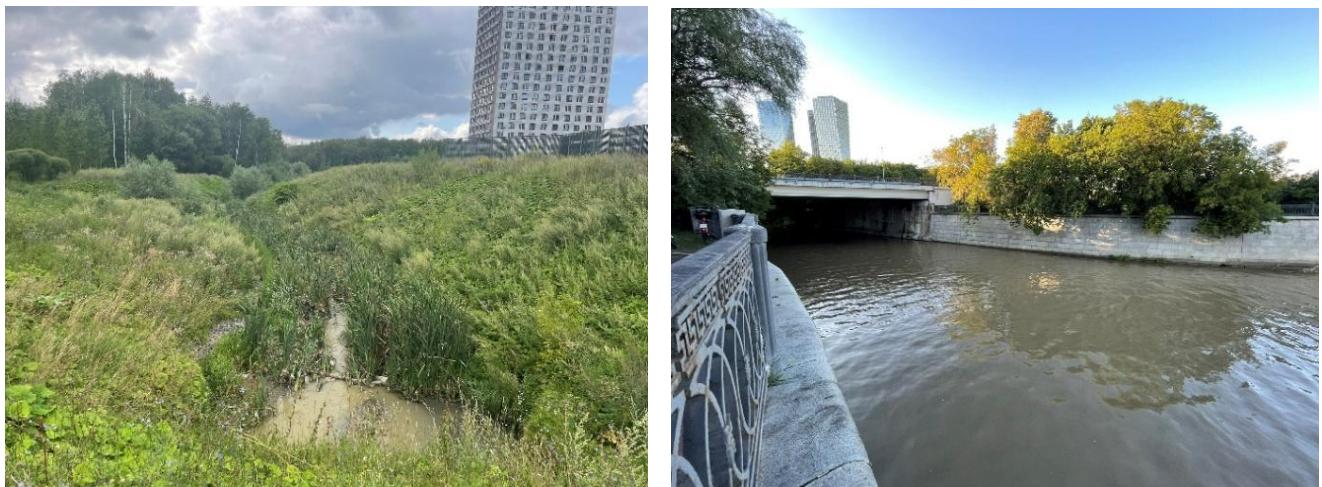


Рисунок 2.2. Исток (слева) и устье (справа) р. Сетунь (фото автора, 02.08.2025)

Средний уклон р. Сетунь составляет 0,0016, бассейн реки вытянут в направлении с запада на восток и характеризуется неправильной формой. Рельеф территории представляет собой слабо расчленённую волнистую равнину с пологими холмами. Долина р. Сетунь двухсторонняя, открытая и пойменная, её ширина достигает 400 м. Поверхность поймы преимущественно ровная, однако на отдельных участках пересекается автомобильными и железными дорогами, а также наблюдаются заболоченные места, эрозионные формы рельефа и наличие бытового и строительного мусора. Берега реки преимущественно обрывистые, высотой около 2–3 метров, с характерной кустарниковой растительностью (**Рисунок 2.3**). Русло р. Сетунь извилистое, на некоторых участках искусственно спрямлённое, неразветвленное.

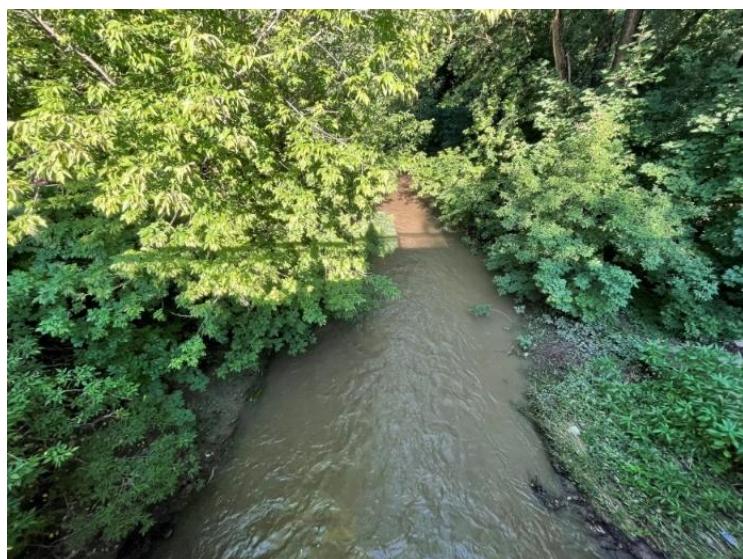


Рисунок 2.3. Русло р. Сетунь у Багрицкого моста (фото автора, 02.08.2025)

Гидрографическая сеть бассейна р. Сетунь включает ряд притоков различного порядка, морфометрические характеристики которых представлены ниже.

Река Сетунька начинается к юго-западу от г. Москвы, в лесном массиве около деревни Говорово, и впадает в Сетунь справа. Площадь водосбора составляет $11,9 \text{ км}^2$, общая длина реки – 5,9 км, средний уклон – 0,0043. Русло извилистое, ширина в пределах 0,7–1,2 м, глубина 0,3–0,5 м. Берега открытые, местами заросшие кустарником. Вдоль Боровского шоссе река проходит в коллекторе и впадает в р. Сетунь ниже очистных сооружений. На Сетуньке расположено три водоёма, которые используются для рекреационных и хозяйственных нужд.

Река Навершка является правым притоком р. Сетунь, начинается примерно в 1,5 км от МКАД, за посёлком Мещерский. На территории посёлка расположен каскад из трёх русловых водоёмов, предназначенных для отдыха населения. Далее река протекает по Гагаринскому району Москвы. Площадь водосбора составляет $11,7 \text{ км}^2$, общая длина реки – 6,4 км, из которых 5 км расположены в пределах Москвы. На двух участках река заключена в трубопровод (**Рисунок 2.4а**).

Река Раменка, также правый приток р. Сетунь, начинается в районе Боровского шоссе и впадает в Сетунь у Минской улицы. Площадь водосбора составляет $44,4 \text{ км}^2$, общая длина реки – 7,1 км. Русло реки извилистое с шириной около 2 м, в среднем течении заключено в трубопровод. В верховьях долина плоская и хорошо выраженная, в средней части и устье наблюдаются крутые берега.

Река Очаковка, левый приток р. Раменки, протекает в открытом русле на ряде участков – от водоёма в Тропарёво до улицы Академика Бакулева и от проезда ниже проспекта Вернадского до впадения в Раменку (**Рисунок 2.4б**). Площадь водосбора составляет $17,5 \text{ км}^2$, общая длина реки – 9,3 км, средний уклон – 0,007.

Река Самородинка, правый приток р. Очаковки, протекает в открытом русле на всем протяжении кроме трех участков: у Ленинского проспекта, проспекта Вернадского и устьевого участка ниже существующих прудов Олимпийской деревни (**Рисунок 2.4в**). Площадь водосбора составляет $10,5 \text{ км}^2$, общая длина реки – 4,4 км, из которых 3,2 км находятся в открытом русле. Русло проходит через застроенную городскую территорию. Прибрежная полоса представляет собой террасу с изрытыми откосами. Правый берег пологий, заросший кустарником, в то время как левый берег крутой, достигающий высоты до 20 м.

Вдоль русел большинства рек сооружены искусственные пруды (**Приложение 1**). Крупный пруд расположен западнее Олимпийской деревни – на р. Очаковке. В пойме Самородинки, в зоне между улицами Пельше и Лобачевского, сформирован каскад нескольких прудов. На Навершке действует два пруда, при этом один из них служит её истоком. В долине р. Сетунь, недалеко от МКАД и вблизи района Троекурово, находятся два природных озера.

Особенностью гидротехнической системы бассейна является наличие обгонных коллекторов – они организованы вдоль большинства прудов. Вследствие чего сток реки не попадает в пруд, а проходит по трубе мимо него. В результате такой схемы регулирование водного режима осуществляется преимущественно прудами, расположенными в верхней части водосбора (на рр. Алёшинке, Сетуньке и Самаринке) [Самохин, Чалов, 2009; Лебедева, Михалёв, 2011].



Рисунок 2.4. (а) Река Навершка у входа в трубопровод около ул. Рябиновой; (б) слияние рек. Раменки и Очаковки около Мичуринского пр-та; (в) река Самородинка между ул. Лобачевского и ул. Доктора Гааза (фото автора, 02.08.2025)

Значительная часть площади водосбора р. Сетунь находится на урбанизированных территориях, представленных административно-жилым сектором, промышленным зонами и дорожным полотном. Для оценки типов землепользования в 2024 г. (**Рисунок 2.5**) были использованы данные OpenStreetMap (далее – OSM)¹⁰ [Денисова и др., 2025]. Выделялось

¹⁰ <https://www.openstreetmap.org/>

9 категорий: (1) природные заказники, (2) земли под застройку (заброшенная территория, которая ранее использовалась, или незастроенная территория, которую планируется застроить), (3) кладбища, (4) строительные площадки, (5) промышленные зоны, (6) свалки, (7) водоёмы, (8) жилые зоны, (9) лесные массивы. Помимо этого, были проанализированы доли водонепроницаемых поверхностей в бассейне. Анализ режима землепользования проведён относительно станций гидрологического мониторинга (см. Рисунок 2.5), которые подробно описаны в Главе 3.

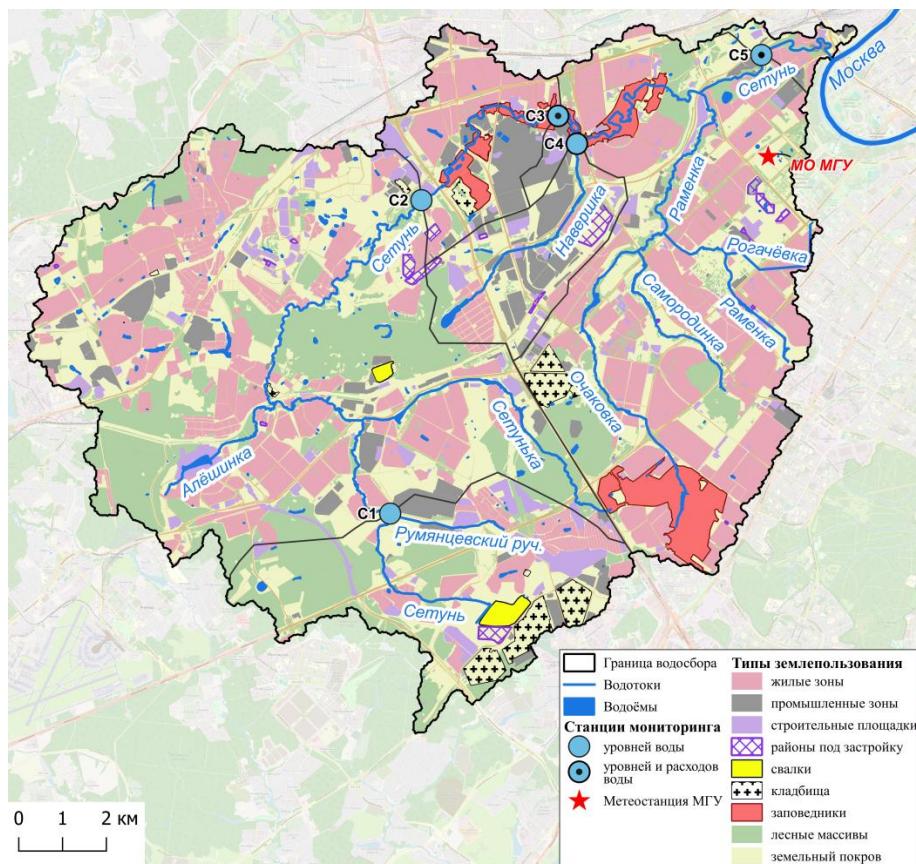


Рисунок 2.5. Станции гидрологического мониторинга и типы землепользования
в бассейне р. Сетунь

Результаты демонстрируют выраженную трансформацию структуры земельного покрова от верховья к устью (Таблица 2.1). Плотность жилой застройки возрастает вниз по течению реки: относительная доля жилых районов на водосборе станции С5 составляет 29,1%, тогда как аналогичный показатель для С1 – 14,8%. Такая динамика обуславливает заметный рост площади водонепроницаемых покрытий – от 24,6% на станции С1 до 37,9% на станции С5 [Денисова и др., 2025]. В отдельных районах бассейна отмечается высокая концентрация промышленных зон. Например, водосбор р. Навершики (С4) полностью находится в пределах промышленных зон Очаково, Южное Очаково, Северное Очаково, где расположены многочисленные заводы, фабрики, ТЭЦ, доля которых составляет 23,8% от площади водосбора,

в то время как для других бассейнов этот показатель варьируется в пределах 5–7%. Средняя доля лесных массивов на исследуемых водосборах составляет около 22–26% от общей площади, однако в бассейнах малых притоков р. Сетунь, расположенных в пределах МКАД, этот показатель снижается до 13,4%.

Таблица 2.1

Типы землепользования на водосборах р. Сетунь в 2024 г.

Тип землепользования	Общая площадь, км ²	% от общей площади бассейна р. Сетунь	Площадь, км ² (%)				
			C1	C2	C3	C4	C5
Природные заказники	5,7	3,0	0	0	1,3 (1,2)	0,004 (0,03)	5,7 (3,2)
Земли под застройку	1,3	0,7	0,2 (0,7)*	0,4 (0,4)	0,5 (0,5)	0,5 (4,5)	1,2 (0,7)
Кладбища	3,4	1,8	1,1 (4,7)	1,2 (1,2)	1,7 (1,5)	0	2,6 (1,4)
Строительные площадки	6	3,2	0,9 (3,7)	3,3 (3,3)	3,5 (3,2)	0,4 (3,9)	5,7 (3,1)
Промышленные зоны	13,3	7,0	1,3 (5,6)	5,4 (5,4)	8 (7,1)	2,7 (23,8)	12,6 (7)
Свалки	0,6	0,3	0,5 (2)	0,6 (0,6)	0,6 (0,6)	0	0,6 (0,4)
Водоёмы	0,01	0,01	0	0	0	0	0,01 (0,01)
Жилые зоны	55	29,5	3,5 (14,8)	24,8 (24,9)	28,4 (25,4)	1,7 (14,7)	52,3 (29,1)
Лесные массивы	44,2	23,3	6,3 (26,7)	25,3 (25,4)	26,9 (24)	1,5 (13,4)	40,5 (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

*В скобках указан процент от площади водосбора.

На правом берегу р. Сетунь находится Мещёрский природный парк, в черте столицы в долине реки устроен природный заказник «Долина реки Сетунь». Несмотря на наличие природных заказников в пределах водосборов C3–C5 их площадь остаётся незначительной – до 3,2% от площади водосбора [Денисова и др., 2025]. Границы заказника в долине р. Сетунь существенно изменились под влиянием строительства и хозяйственной деятельности (Рисунок 2.6). Наибольшие изменения пришлись на 2016 год; в целом за все время площадь исключённых и включённых участков достигла около 16% максимальной территории ООПТ (особо охраняемой природной территории), при этом около 38% исключённых площадей было выведено в 2006 г. ради строительства проспекта генерала Дорохова и жилых комплексов в

нижнем течении р. Раменка. За последние годы площадь охраняемой зоны сократилась, а оставшиеся участки стали более фрагментированными. Большинство исключённых территорий сейчас заняты жилой застройкой и инфраструктурой, а новые включённые участки – преимущественно лесами и зелёными насаждениями [Крюков, Голубева, 2021].

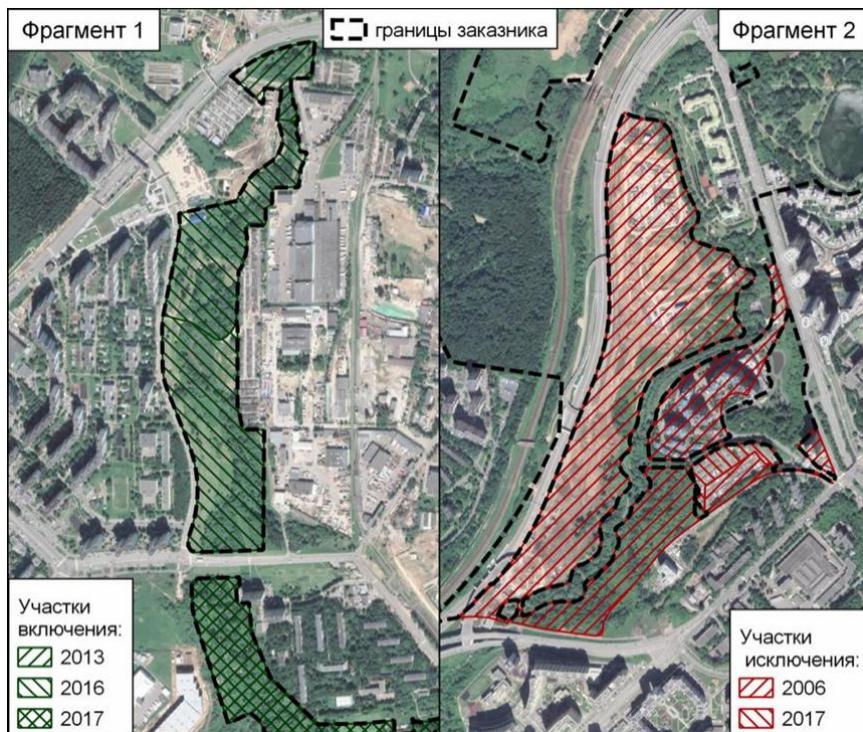


Рисунок 2.6. Характерные изменения границ заказника «Долины реки Сетунь»

[Крюков, Голубева, 2021]

Для оценки динамики площади застройки в бассейне р. Сетунь с 2019 по 2024 г. был проведён анализа данных спутников Landsat 8–9 с использованием мультиспектральных и тепловых каналов приборов OLI и TIRS уровня обработки Level 2¹¹ – обработанные спутниковые снимки с атмосферной коррекцией обеспечивают более точное определение отражательной способности поверхности. Расчёт вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) позволил разграничить территории с густой растительностью от застроенных и непроницаемых поверхностей, для которых характерны более низкие значения. Площадь застройки за рассматриваемый период практически не изменилась, оставшись на уровне около 64,8–64,9 км², что составляет примерно 34% от общей площади водосбора р. Сетунь. Полученные результаты свидетельствуют о стабилизации застроенных территорий в этом районе на протяжении пяти лет. Однако важно учитывать, что данный метод имеет свои

¹¹ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

ограничения и погрешности: NDVI отражает преимущественно состояние растительности, а искусственные непроницаемые поверхности выделяются по низким значениям индекса, которые, в свою очередь, могут соответствовать другим типам поверхностей (например, открытая почва, влажные участки или затенённые зоны), что может приводить к ошибкам классификации. Кроме того, пространственное разрешение спутниковых данных (30 м) ограничивает точность выделения мелких объектов и границ зон застройки.

В Сетунь и её притоки регулярно поступают сточные воды, а также бытовой мусор. В бассейне также находится 6 стационарных снегоплавильных пунктов (**Таблица 2.2, Рисунок 2.7**)¹² и осуществляется сброс через 74 водовыпуска (**Приложение 2**), что свидетельствует о высокой степени урбанизации бассейна реки и значительном влиянии городской инфраструктуры на режим р. Сетунь.

Таблица 2.2

Описание снегоплавильных пунктов в бассейне р. Сетунь

Код объекта	Наименование объекта	Хозяйствующий субъект	Амин. округ	Район	Производ. м ³ /сут.
1699215	Стационарные снегоплавильные пункты «Миклухо-1 2»	АО «Мосводоканал»	ЮЗАО	Обручевский	7000
1699218	Стационарный снегоплавильный пункт «Лобачевский-1»		ЗАО	Проспект Вернадского	2100
1699219	Стационарный снегоплавильный пункт «Лобачевский-2»				3500
1699220	Стационарный снегоплавильный пункт «Боровский»			Солнцево	3500
13894935	Стационарный снегоплавильный пункт у ТЭЦ-25	ГУП «Мосводосток»		Очаково-Матвеевское	1650
880890188	Стационарный снегоплавильный пункт «Верейский»			Можайский	7000

¹² <https://data.mos.ru/>

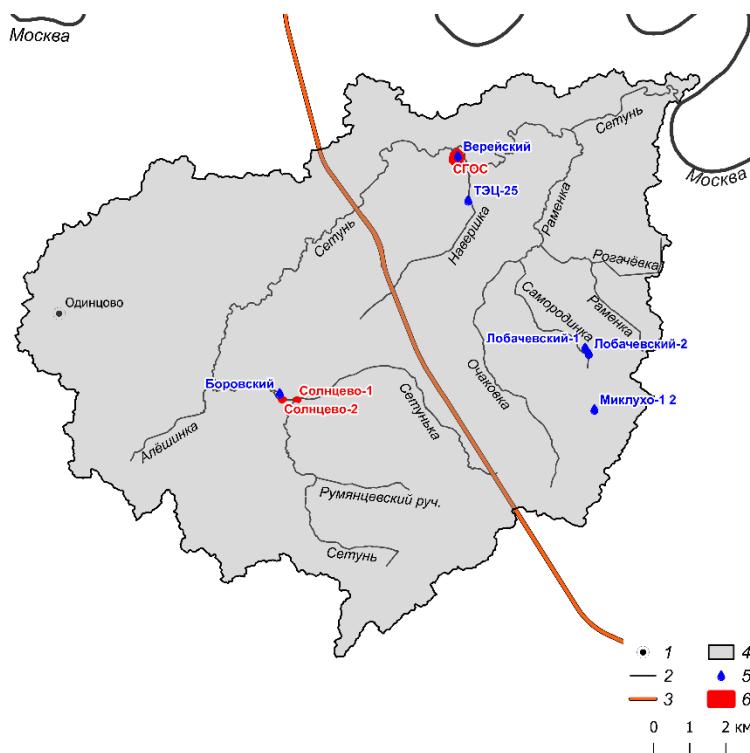


Рисунок 2.7. Схема водохозяйственных объектов бассейна р. Сетунь
(1 – населённые пункты ($>100,000$ человек), 2 – водотоки, 3 – МКАД, 4 – водосбор
р. Сетунь, 5 – снегоплавильные пункты, 6 – очистные сооружения)

В Таблице 2.3 представлен анализ данных по водопользованию и сбросам сточных вод с Автоматизированной информационной системы Государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО)¹³. Общий забор пресной воды из природных водных объектов варьируется от 2 до 3,3 млн m^3 в год за период с 2020 по 2024 г. Несмотря на незначительные колебания, прослеживается тенденция небольшого роста, что говорит о постепенном увеличении потребностей в водных ресурсах. С учётом потерь при транспортировке объём забранной воды несколько снижается, но динамика остаётся схожей. На питьевые и хозяйственно-бытовые нужды использовано от 0,8 в 2020 г. до 1,4 млн m^3 в 2024 г., что возможно связано как с ростом населения, так и с ростом стандартов водопотребления. Использование на производственные нужды остаётся относительно стабильным за исследуемый период (около 0,6–0,7 млн m^3), а доля сельско-хозяйственного водоснабжения незначительна в общем объёме. При этом явно выражено превышение сбросов над забором воды, объём которых находится в диапазоне от 12,9 до 21,7 млн m^3 . Основную часть сбросов составляют сточные воды, в том числе ливневые; их объём увеличился с 5,5 млн m^3 в 2020 г. до 20 млн m^3 в 2024 г. В то же время сброс коллекторно-дренажных вод существенно сократился (с

¹³ <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=513>

7,4 до 1,7 млн м³). Среднегодовой объём стока р. Сетунь по данным мониторинговой сети за 2020–2023 гг. был около 76,32 млн м³. Забор пресной воды составил относительно небольшую долю – от 2,5% до 4,6% от объёма стока, при этом среднее значение приблизительно равно 3,8%. В то же время суммарный объём сброса сточных вод значительно выше забора и в среднем равен 25,9% от стока, варьируясь от 16% (2020 г.) до 30,5% (2021 г.). Основную часть сбросов составляют сточные воды, включая ливневые, доля которых растёт с 6,8 до 26,1% в 2020–2024 гг.

Таблица 2.3

Данные наблюдений за объёмом вод (в млн м³) при водопотреблении и водоотведении на водосборе р. Сетунь за период 2020–2024 гг.

	Всего	2020	2021	2022	2023	2024
Забрано пресной воды из природных водных объектов для использования	14,4	2	2,8	3,2	3,1	3,3
Забрано с учётом потерь при транспортировке	14,2	2	2,8	3,1	3	3,2
Использовано пресной воды (в том числе на нужды)	питьевые и хозяйственно-бытовые	5,8	0,8	1,1	1,3	1,2
	производственные	3,5	0,6	0,7	0,8	0,7
	орошения регулярного	0,1	0	0	0	0
	сельско-хозяйственного. водоснабжения	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1
	прочие	4,3	0,6	0,9	0,9	1
Сброшено	Всего	97,7	12,9	21,8	20,6	20,7
	сточной (в т.ч. ливневой)	64,3	5,5	10,8	9,6	18,4
	коллекторно-дренажной	33,4	7,4	11	11	2,3
						1,7

В пределах бассейна р. Сетунь, по имеющимся данным¹⁴, функционирует несколько очистных сооружений, включая два пруда-отстойника «Солнцево-1» и «Солнцево-2», а также Сетуньские групповые очистные сооружения (далее – СГОС) (см. Рисунок 2.7). Пруд-отстойник «Солнцево-1» на р. Сетуньке предназначен для очистки дождевой канализации и эксплуатируется ГУП «Мосводосток». Он был введён в эксплуатацию в 1989 г. и находится на балансе эксплуатационного гидротехнического района №8 ГУП «Мосводосток». Площадь участка, на котором расположен пруд-отстойник составляет около 0,01 км², при этом площадь

¹⁴ <https://wikimapia.org/>

охватываемого водосбора составляет $5,1 \text{ км}^2$ (что составляет около 2,7% от общей площади водосбора р. Сетунь). Очищение воды осуществляется по трёхступенчатой схеме, при этом проектная производительность составляет $0,83 \text{ м}^3/\text{ч}$. О пруде-отстойнике «Солнцево-2» достоверные сведения отсутствуют за исключением данных о его местоположении.

СГОС были введены в эксплуатацию в 1993 г. Согласно открытым источникам¹⁵, они предназначены для обработки поверхностных и сходных по составу производственных стоков предприятий-абонентов бассейна р. Сетунь, расположенных в промзоне № 37 «Очаково». Основное направление их работы – удаление взвешенных веществ (далее – ВВ) и нефтепродуктов. Проектная производительность сооружений составляет 14,1 тыс. м^3 в сутки, при этом площадь района канализации СГОС охватывает около $0,83 \text{ км}^2$. Сооружения были построены в 1980-х гг. и находятся в ведении Московского государственного унитарного предприятия (МГУП) «Промотходы». Очистка на них проводится с применением химических и механических методов. Очищенная вода сбрасывается в р. Сетунь, при этом часть её используется для заправки поливомоечных машин промышленных предприятий. Осадок, образующийся в процессе очистки, обезвоживается, затем обеззараживается на специализированных иловых площадках и применяется для создания технологического изоляционного слоя на полигонах МГУП «Промотходы», а также в производстве строительных блоков [Аксенов и др., 2002].

2.2. Гидроклиматические особенности бассейна

Для анализа климатического режима бассейна р. Сетунь были использованы данные измерений на метеорологической обсерватории МГУ (далее – МО МГУ) за период с 1979 по 2022 г. (**Таблица 2.4**). Среднемесячная температура воздуха варьируется от $-6,6^\circ\text{C}$ в январе до $+19,5^\circ\text{C}$ в июле. Наиболее высокие значения температуры с 1979 г. были зарегистрированы в июле и августе 2010 г. и достигали $+38,1^\circ\text{C}$, когда в России наблюдался продолжительный период аномально жаркой погоды. Зима в регионе в среднем длится около 4 месяцев – с середины ноября до середины марта. Абсолютный минимум температур наблюдался в январе 1979 г., опускаясь до $-33,7^\circ\text{C}$, однако для Москвы это явление достаточно редкое за последние 40 лет, так как абсолютный минимум ниже -30°C отмечался лишь в 4 случаях – в 1979, 1987, 2003 и 2006 гг.

В течение всего года в Москве преобладает ветер юго-западного и западного направлений. Скорость ветра имеет слабо выраженный годовой ход – среднемесячные

¹⁵ http://www.promotkhody.ru/index.php?show_aux_page=25

показатели по данным МО МГУ варьируются от 3,3 м/с в летний до 3,8 м/с в зимний период. За год в бассейне р. Сетунь выпадает около 730 мм осадков, причём преобладающая часть приходится на тёплый период. Сумма осадков в июне в 2,2 раза превышает сумму осадков за март. Максимальное суточное количество осадков зарегистрировано в августе 2016 г. и составило 108,5 мм, однако такие ливни в Москве редки, повторяемость суточных сумм более 40 мм даже в летние месяцы не превышает 10%. Наиболее вероятным для летнего сезона является суточный максимум осадков 10–30 мм. Относительная влажность изменяется от 64,6 в апреле до 80% в ноябре. Вместе с тем в 2013 г. впервые за весь рассматриваемый период наблюдений годовая сумма осадков составила 1015,8 мм.

Таблица 2.4

Данные измерений на МО МГУ за период с 1979 по 2022 г.

Месяц	Температура воздуха, °С					Сумма осадков, мм
	Абсолютный максимум	Средний суточный максимум	Средняя температура	Средний суточный минимум	Абсолютный минимум	
Январь	8,7	-4,2	-6,6	-9,1	-33,7	54,3
Февраль	8,7	-3,2	-6,1	-9,0	-28,9	42,8
Март	19,5	2,7	-0,9	-4,0	-21,0	38,8
Апрель	28,5	11,3	6,9	3,0	-12,8	40,6
Май	33,8	19,0	13,8	9,1	-3,6	59,9
Июнь	33,7	22,4	17,6	12,8	1,0	84,1
Июль	38,1	24,3	19,5	15,0	6,3	83,7
Август	38,0	22,4	17,7	13,3	3,2	79,0
Сентябрь	30,4	16,1	11,8	8,4	-4,3	70,5
Октябрь	24,4	8,9	5,8	3,2	-11,3	65,1
Ноябрь	16,1	1,2	-0,8	-2,8	-22,7	54,6
Декабрь	10,0	-2,5	-4,7	-6,9	-27,2	56,4
Год	24,2	9,9	6,2	2,7	-12,9	729,8

Анализ динамики изменения температуры воздуха по данным МО МГУ с 1979 г. выявил значимый положительный тренд ($0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$) (Рисунок 2.8). Согласно исследованию [Чубарова и др., 2014], его величина существенно увеличилась при сравнении двух периодов 1954–2013 гг. и 1976–2012 гг. – $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ против $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Положительная тенденция роста температуры воздуха фиксируется во всех месяцах года, однако наибольшая скорость повышения наблюдается в январе ($0,07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$) и в марте–апреле ($0,06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Наименьшие темпы роста зафиксированы в июне и сентябре ($0,02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Если сравнивать полученные данные с климатической нормой (1961–1990 гг.), то температура воздуха увеличилась на $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ за период с 2004 по 2013 г.

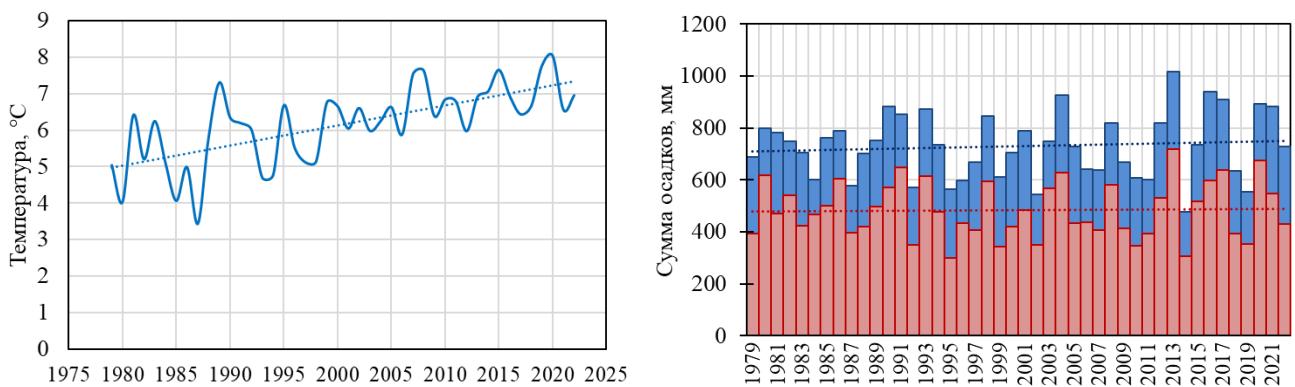


Рисунок 2.8. Динамика среднегодовой температуры воздуха (слева) и сумм осадков за год (синие столбцы) и тёплый период (красные столбцы) (справа) на МО МГУ за 1979–2022 гг.
(пунктирные линии – линейные тренды)

Различия в метеорологических характеристиках городской территории и прилегающих районов вне города, как обсуждалось ранее (см. Главу 1), характеризуются понятием «остров тепла». В московской агломерации вертикальное распространение таких «островов» достигает около 2 км. Летом нижняя часть острова тепла проявляется как «остров сухости», тогда как верхняя – как «остров влажности». Зимой же нижний слой сохраняет признаки «острова влажности» на протяжении суток, а в верхних слоях в вечернее время появляются отрицательные аномалии, образующие «остров сухости». Урбанизация практически не влияла на микроклимат Москвы до начала XXI в., когда температура в Москве и Подмосковье росла с почти одинаковой скоростью. С начала 2000-х годов в Москве заметно усилилось потепление, что выражается в росте интенсивности городского острова тепла, несмотря на замедление глобального потепления. За период 1977–1997 гг. интенсивность острова тепла увеличивалась примерно на 0,05 °С в год, причём летом рост был более выражен, чем зимой [Кислов и др., 2017]. В результате воздействия городского «острова тепла» средняя температура воздуха в центре столицы сейчас примерно на 2 °С выше, чем в сельских районах Подмосковья [Локощенко, 2017].

За последние 50 лет в Москве наблюдается общая стабилизация годового количества осадков, несмотря на продолжающийся климатический тренд к потеплению (см. Рисунок 2.8). Климатическая норма осадков за период 1961–1990 гг. составляла примерно 683 мм в год, тогда как по данным за период 1991–2020 гг. этот показатель изменился незначительно и составил около 714 мм [Локощенко, 2023]. При этом сезонные изменения имеют более выраженный характер: весной (в апреле и мае) отмечается снижение осадков, тогда как в осенние месяцы наблюдаются значительные положительные тренды, достигающие 0,5–0,6 мм в год, что сопровождается сдвигом наиболее «сухого» месяца с марта на апрель [Чубарова и др., 2014]. Кроме того, с начала XXI в., согласно данным за 1997–2017 гг., выявлено значительное

увеличение интенсивности кратковременных ливней – слой дождя с повторяемостью один раз в год составляет 24,9 мм [Болгов, Арефьева, 2021].

Москва оказывает значительное влияние не только на температурный режим, но и на поле влажности. Баланс влаги в городской среде формируется за счёт нескольких факторов: переноса водяного пара с атмосферными потоками, выпадения осадков непосредственно в пределах города, поступления влаги из техногенных источников, включая утечки из водопроводных сетей (которые в Москве составляют около 10–20% от общего объёма водоподачи), а также сжигания органического топлива. Выполненные расчёты показывают, что влага, поступающая за год в результате сжигания природного газа, при пересчёте на площадь города оказывается примерно в 12–15 раз меньше среднемноголетней величины годового слоя осадков в Москве. Вместе с тем, искусственные покрытия городских поверхностей существенно снижают уровень испарения, что приводит к уменьшению содержания атмосферной влаги. Баланс этих противоположных процессов зависит от плотности застройки, интенсивности хозяйственной деятельности и природно-климатических условий конкретного региона [Кислов, 2017].

2.3. Особенности развития русел рек бассейна

Бассейн р. Сетунь находится в центре Восточно-Европейской равнины, на древней Русской плите. Природные особенности бассейна определяются его близким расположением к Теплостанской возвышенности, которая служит водоразделом между бассейнами рек Москва и Пахра. Средняя высота междуречий составляет 180–200 м, максимальная – 222 м – в районе пересечения Теплостанской возвышенности МКАД. Территория бассейна характеризуется глубокой древней и современной изрезанностью местности. Все современные эрозионные формы наследуют в той или иной степени доледниковые врезы. Возвышенность глубоко расчленена балками и оврагами, речные долины здесь глубоко врезаны и носят выработанный характер. Реки Сетунь и Раменка не только прорезают толщу четвертичных отложений, но и вскрывают коренные породы.

В геологическом плане Теплостанская возвышенность и прилегающая к ней территория представляет собой довольно высоко приподнятый выступ коренных горных пород. В основании выступа залегают известняки каменноугольного периода, прикрытые юрскими глинами и песками мелового возраста, которые вскрываются в некоторых обнажениях на крутом коренном склоне долины Москвы-реки в районе Воробьевых гор (**Рисунок 2.9**). В четвертичном периоде бассейн р. Сетунь, как и все Подмосковье, неоднократно покрывался ледниками.

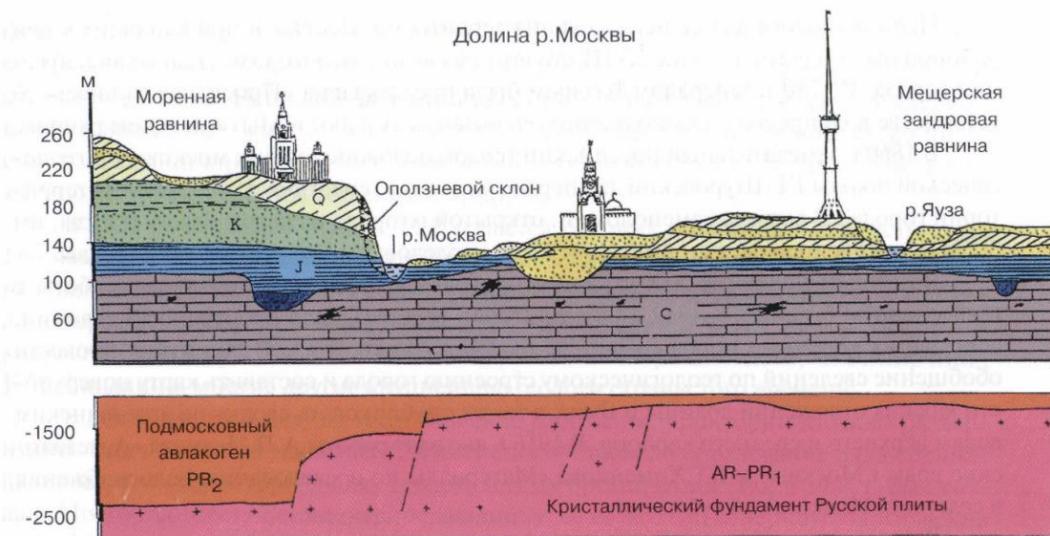


Рисунок 2.9. Схематизированные разрезы верхней части земной коры территории Москвы (AR-PR₁ – архейско-нижнепротерозойский комплекс пород кристаллического фундамента, PR₂ – верхний протерозой, С – палеозой, J и K – юрские и меловые отложения мезозоя, Q – комплекс четвертичных отложений) [Москва: Геология и город, 1997]

Бассейн р. Сетунь расположен в пределах Москворецко-Окской моренно-эрэзионной равнины и входит в состав Теплостанской останцовой эрозионной возвышенности. При более детальном рассмотрении территорию бассейна можно разделить на три геоморфологических района: юго-восточная часть занимает нижнюю ступень холмисто-пологоувалистой Теплостанской моренной возвышенности, перекрытой покровными суглинками; северо-западная часть представлена возвышенной моренной Кунцевской равнины московского возраста с участками флювиогляциальных отложений. Между этими двумя возвышенностями располагается долинный комплекс р. Сетунь, сформированный в ложбине стока талых ледниковых вод и её притоков [Москва: Геология и город, 1997].

На территории Москвы зафиксировано 15 крупных зон развития глубоких блоковых оползней, сконцентрированных в основном вдоль русел Москвы-реки и её притоков. Ярким примером негативного влияния оползневых процессов на инфраструктуру стала разрушенная эскалаторная галерея на Воробьёвых горах – сооружение начало деформироваться уже вскоре после постройки, и весь период эксплуатации сопровождался трещинообразованием и подвижками конструкций, что вынудило остановить его работу и впоследствии демонтировать сооружение. При этом оползневой процесс продолжается, а среднегодовая скорость перемещений на этих участках составляет порядка 5 мм/год. Активное развитие оползней провоцирует трансформацию русел рек, изменение линий фарватера, а также существенное сужение водных потоков – как, например, в районе Москворечья, где из-за нерациональных инженерных решений ширина русла сократилась практически вдвое [Аникеев и др., 2020].

В условиях городской застройки русла рек подвергаются существенной модификации – за счёт искусственного спрямления русел происходит образование протяжённых участков с линейной формой. Анализ современных спутниковых данных в сочетании с материалами немецкой аэрофотосъёмки территории СССР 1942 г.¹⁶ демонстрирует, что на р. Сетунь длина таких прямолинейных отрезков, занимающих места бывших излучин, достигает 2 км (**Рисунок 2.10**).

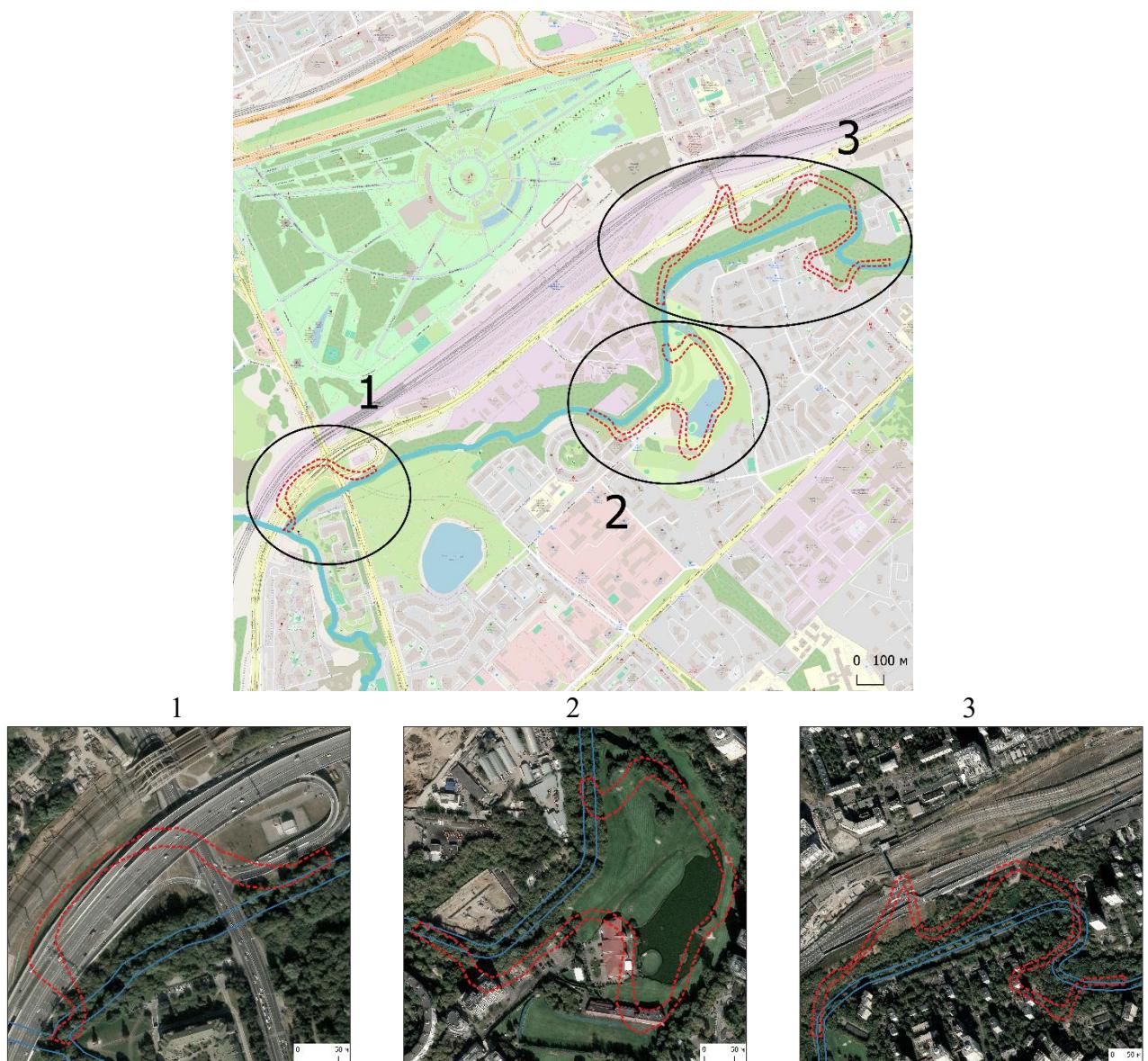


Рисунок 2.10. Изменения русла р. Сетунь с 1942 (красная линия) по 2024 гг. (синяя линия)
 (1) на пересечении пр-та Генерала Дорохова и ул. Минской; (2) между пр-том Генерала Дорохова и ул. Довженко; (3) между пр-том Генерала Дорохова и 2-ым Мосфильмовским переулком

¹⁶ <https://retromap.ru/>

В 1950-х гг. Сетунь протекала исключительно по неурбанизированной территории, пересекала лишь несколько дорог, а её долина сохранялась как зона, где не велось массового строительства капитальных сооружений и жилого фонда. В настоящее время Сетунь протекает в пределах МКАД по преимущественно равнинной местности. Основные факторы, влияющие на формирование русла, такие как водность реки, геологогеоморфологические условия, антропогенное воздействие и прибрежная растительность, обуславливают различия в характере русловых деформаций на отдельных участках.

В целом, в пределах МКАД наблюдается более чем пятикратное увеличение водности реки [Самохин, Чалов, 2009]. Это сопровождается продольным увеличением мощности речного потока и, соответственно, его транспортирующей способности, что дополнительно усиливается выпуклым характером продольного профиля русла р. Сетунь. В нижнем течении, на участке длиной около 2 км, река пересекает возвышенность Воробьевых гор и впадает в Москву-реку. За счёт толщи трудноразмываемых пород происходило отставание скорости врезания русла р. Сетунь по сравнению с формированием долины Москвы-реки. Это привело к постепенному развитию резкого перепада уклонов русла при переходе от вышерасположенных равнинных участков р. Сетунь к её базису эрозии [Чалов, Самохин, 2009].

Укрепление дна русла в местах мостовых переходов обусловило ступенчатость продольного профиля р. Сетунь, которая проявляется в виде локальных базисов эрозии под основными автодорожными мостами, пересекающими реку. Образуются участки с неразмываемым дном, укрепленные противоэрэзионными мероприятиями, такими как каменная наброска и укладка бетонных блоков. Вдоль русла наблюдаются перегибы профиля (пороги), ниже которых формируются глубокие ямы размыва глубиной до 2–3 м (**Рисунок 2.11**) [Чалов, Самохин, 2009]. В промежутках между этими локальными базисами продольный профиль приобретает вогнутую форму, максимально приближенную к выработанному природному состоянию. Так, в начале участков между мостовыми переходами (локальными базисами эрозии) преобладает размыв русла, в нижней части ближе к следующему мостовому переходу (базису эрозии) – аккумуляция наносов.

Вертикальные русловые деформации реки носят техногенный характер. В первую очередь, это связано с поступлением большого количества мелкодисперсного материала бассейнового происхождения (поверхностный смыв с бортов долины и из ливневой канализации). Дно русла выстилается слоем полуразложившейся илистой органики. Его мощность увеличивается в пределах плёсовых участков, где в некоторых местах достигает 0,5 м [Чалов, Самохин, 2009]. Во-вторых, наблюдается значительное захламление русла и формирование серий локальных подпоров, что приводит к ухудшению транспортирующей способности речного русла.

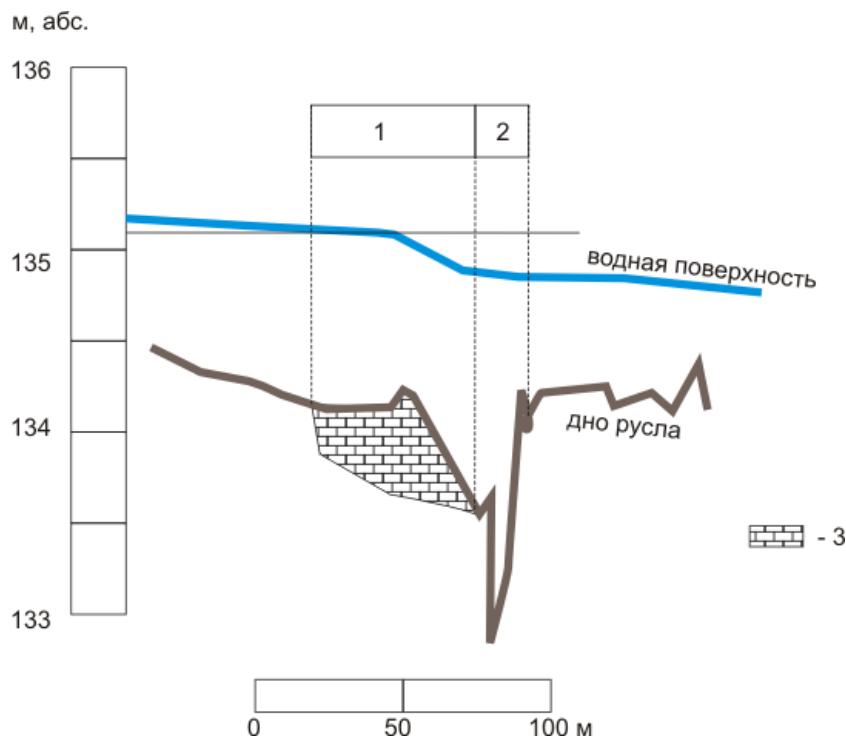


Рисунок 2.11. Местный базис эрозии (1) и яма размыва (2) при пересечении р. Сетунь Рябиновой ул. (3) – техногенные неразмываемые грунты [Чалов, Самохин, 2009]

По длине реки существенно изменяются и горизонтальные русловые деформации, что связано как с наличием берегоукрепительных и руслоправительных сооружений, так и с различиями в геолого-геоморфологических условиях. Прибрежный древесный пояс ограничивает развитие меандрирования, формируя локальные зоны подмыва берегов без смещения динамической оси потока. В то же время, на р. Сетунь отмечается активный размыв берегов, сопровождающийся оползанием блоков пойменных уступов.

Почвенный покров бассейна р. Сетунь характеризуется ярко выраженной мозаичностью, сформированной под влиянием антропогенных и природных факторов. Большинство почвенных участков имеют размер около 10–20 га и чёткие геометрические границы, что отражает антропогенный характер ландшафта. В исследовании [Gerasimova et al., 2024] авторы выделили несколько основных типов почв: зональные дерново-подзолистые, распространённые под зелёными насаждениями, особенно в западной части бассейна. Они часто содержат антропогенные включения – мусор, строительные материалы, следы поверхностного перемешивания и засыпки. К категории естественных также относятся серогумусовые почвы на склонах, аллювиальные серогумусовые, перегнойно-глеевые и торфяно-глеевые, приуроченные к понижениям рельефа и местам с высоким уровнем грунтовых вод. Вторая категория включала в себя антропогенные почвы: (1) урбанизёмы (селитебная функциональная зона города), (2) реплантозёмы (зона автодорог и нежилой застройки), (3) конструктозёмы (зона спортивных площадок), (4) экранозёмы (запечатанные почвы) и (5) почвы городских кладбищ.

Ранее бассейн р. Сетунь значительно отличался от современного состояния – растительность была представлена преимущественно сосново-лиственным лесом. Пойма р. Сетунь была заболоченной и покрытой ольховыми лесами, а пойма р. Раменки представляла собой луга. Сегодня участки ольхового леса практически исчезли, а пойма Раменки частично распахана и занята огородами. Широколиственные леса сохранились преимущественно на окраинах города, примыкая к МКАД. Большая часть территории бассейна занята вторичными берёзовыми и осиновыми насаждениями, а также урбанизированными зелёными насаждениями – парками и искусственными посадками [Лошаков и др., 2018].

Таким образом, выявленные природные и антропогенные особенности бассейна р. Сетунь определяют необходимость выбора и адаптации специальных методов изучения его водного режима, что подробно рассматривается в следующей главе.

Глава 3. Методы изучения водного режима малого урбанизированного водосбора

3.1. Характеристика гидрологического мониторинга в бассейне р. Сетунь

С 2019 г. в бассейне р. Сетунь функционирует система гидрологического мониторинга, осуществляемого географическим факультетом МГУ [Соколов и др., 2021; Цыпленков и др., 2021; Ерина и др., 2022; Терский и др., 2023; Чалов и др., 2023а]. Проводимый мониторинг является уникальным многолетним экспериментом высокочастотной регистрации уровня воды, так как данные на сети станций были получены с помощью автоматизированных датчиков уровня воды NOVO U20L (точность определения ± 2 см), Solinst Levelogger 5 Junior (точность определения ± 1 см) и Keller DCX-22-ECO (точность определения ± 1 см) с дискретностью записи 30 мин, начиная с 14 ноября 2019 г.

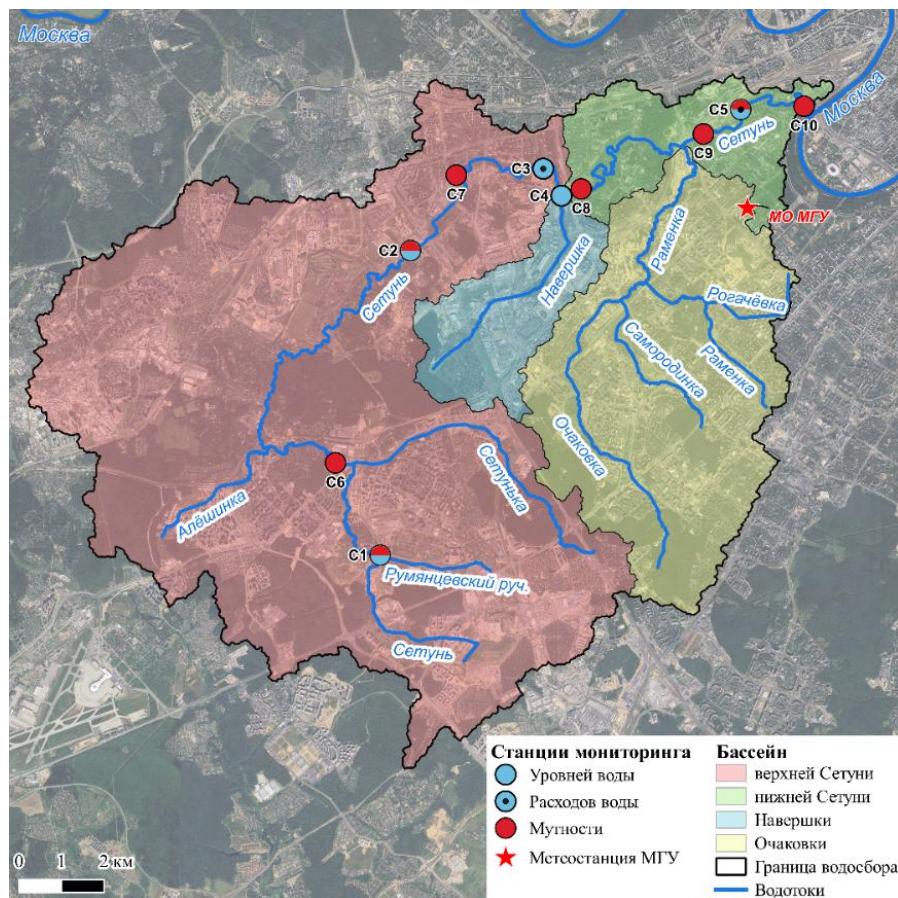


Рисунок 3.1. Схема водосбора р. Сетунь и расположения станций мониторинга

Всего в бассейне расположено 10 станций мониторинга: 5 из них – уровневые посты (Рисунки 3.1, 3.2), при этом 2 поста одновременно выполняют функции расходных станций (Приложение 3). Измерения мутности производились на 7 станциях (см. Главу 5). В связи с различными обстоятельствами, прежде всего вследствие случаев вандализма, приведших к

потере отдельных датчиков, продолжительность серий записей на постах неодинакова. Для станций мониторинга уровней воды С1 и С4 полученные ряды не покрывают целиком ни один полный год в период мониторинга (**Таблица 3.1**).



Рисунок 3.2. Станции мониторинга на р. Сетунь (а – С1, б – С2, в – С3, г – С4, д – С5)
(фото автора и Чалова С.Р.)

Таблица 3.1

Описание автономной сети гидрологических станций

Пост	Река	Площадь бассейна, км ²	Расстояние до устья, км	Период измерений (с – по)	Тип измерений	Количество измерений расходов*
C1	Сетунь	23,64	32	14.12.19 – 28.02.20	Уровни	2
C2	Сетунь	99,59	17	14.12.19 – 05.03.22	Уровни	4
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	11
C4	Навершка	11,2	0,1	24.11.20 – 12.07.21 30.09.21 – 11.04.22	Уровни	3
C5	Сетунь	180,14	2	14.11.19 – 14.04.25 08.05.25 – н.в.	Уровни, расходы, мутность	22

*По состоянию на сентябрь 2025 г.

Пост С1 (площадь бассейна – 23,64 км², расстояние до устья – 32 км) расположен в верховьях бассейна р. Сетунь, примерно в 25 м ниже слияния р. Сетунь с Румянцевским ручьём, в 3 км от полигона ТБО (твёрдых бытовых отходов) Саларьево. Мониторинг уровня воды осуществлялся с 14.12.2019 по 28.02.2020, за этот выполнено 2 измерения расхода воды.

Пост С2 (площадь бассейна – 99,59 км², расстояние до устья – 17 км) размещён ниже впадения рр. Сетуньки и Алешинки, а также выше МКАД. Измерения уровня воды проводились с 14.12.2019 по 05.03.2022; зафиксировано 4 измерения расхода воды. Датчик был установлен стационарно.

Пост С3 (площадь бассейна – 112,01 км², расстояние до устья – 12 км) расположен ниже МКАД и выше устья рр. Навершки и Раменки. Станция функционировала в нескольких временных интервалах: 14.11.2019–26.06.2020, 24.11.2020–09.12.2022, с 14.07.2023 по настоящее время. Здесь ведутся наблюдения за уровнями и расходами воды. За весь период (по состоянию на сентябрь 2025 г.) выполнено 11 измерений расхода. С 14.07.2023 створ был перемещён на 300 м вверх по течению, а также установлен логгер другой фирмы (Keller DCX-22-ECO).

Пост С4, расположенный на р. Навершка (площадь бассейна – 11,2 км², расстояние до устья – 0,1 км), функционировал в два отдельных периода: с 24.11.2020 по 12.07.2021 и с 30.09.2021 по 11.04.2022. На посту осуществлялся мониторинг уровня воды, за время наблюдений проведено 3 измерения расхода.

Пост С5 расположен в 2 км от устья р. Сетунь, площадь его бассейна – 180,14 км². Створ установлен 19 ноября 2019 г. и функционирует непрерывно, за исключением периода с 14.04.2025 по 08.05.2025, связанного с техническими неисправностями датчика. На данном

посту измеряются уровни, расходы и мутность воды. Всего проведено 22 измерения расхода воды.

В районе поста С5 река сохраняет характер свободно меандрирующего потока; сам створ размещён на прямолинейном участке между двумя излучинами. Русло покрыто мощным слоем полуразложившейся органики, формирующей густой илистый субстрат, который аккумулирует значительную часть ЗВ, поступающих с вышерасположенных частей водосбора. Берега излучин в настоящее время укреплены инженерными сооружениями, возведёнными при благоустройстве территории и прокладке прогулочных дорожек. Створ установлен под левым берегом в месте пересечения реки с трубопроводом, на металлической опоре – трубе, сохранившейся от прежней мостовой конструкции. В 50 метрах ниже по течению, с правой стороны, в русло выходит канализационная металлическая труба, служащая опорной точкой для измерений, из которой также фиксировались эпизодические сбросы сточных вод (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3. Сброс сточных вод с повышенной мутностью в р. Сетунь 07.09.2020 г.
(фото Чалова С.Р.)

Методика обработки высокочастотных данных проводится в несколько этапов:

- 1) логгеры фиксируют суммарное давление воды и атмосферы. Для расчёта уровня воды над логгером производится барометрическая компенсация (3.1) по данным метеостанции Балчуг¹⁷:

$$h = (P_{logger} - P_0) \times 0,0101972 \quad (3.1)$$

где h – уровень воды над логгером (м), P_{logger} – суммарное давление воды и атмосферы (гПа), P_0 – величина атмосферного давления (гПа), 0,0101972 – коэффициент перевода давления в высоту столба воды, основанный на гидростатическом уравнении.

- 2) поскольку после каждого считывания данных логгер возвращается не точно в исходное положение, возникает необходимость увязки уровней воды до и после каждого извлечения прибора. В момент повторной установки логгера уровень фиксировался с точностью до сантиметров – данная корректировка обеспечивает сопоставимость последовательных измерений;

- 3) на расходных постах в различные ФВР эпизодически измерялись расходы воды методом «скорость-площадь» при помощи измерителя скорости потока ИСП-1М. Заключительным шагом обработки является построение кривых $Q = f(H)$, что позволяет оценить 30–минутные расходы воды за весь период мониторинга. На участке С5 ниже по течению для измерения расхода воды также использовались акустические доплеровские профилографы течений (ADCP) 600 kHz Teledyne RDInstruments RioGrande WorkHorse.

По данным геодезической съёмки масштаба 1:500, выполненной в створах С3 и С5 в бассейне р. Сетунь (**Рисунок 3.4**), в программе Profiles2012M были рассчитаны координаты кривых зависимостей площади сечения (W) и ширины (B) от уровня воды (H) для руслового и пойменных отсеков (**Рисунок 3.5**) [Кокорев, 2012].

Скорость (V) для каждого расчётного горизонта определялась по формуле (3.2):

$$V = \frac{1}{n} \times H_{cp}^{\frac{1}{6}} \times (H_{cp} \times I)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

где V – скорость течения, м/с; n – коэффициент шероховатости; H_{cp} – средняя глубина; I – уклон.

Затем в одинаковом вертикальном масштабе были построены кривые расходов $Q = f(H)$, площадей $W = f(H)$ и скоростей $V = f(H)$ (**Рисунок 3.6**). Кривая средних скоростей $V = f(H)$ обычно имеет выпуклость к оси V , а при выходе воды на пойму получает перелом в сторону оси H , что обусловлено уменьшением средней скорости ввиду значительного увеличения площади живого сечения [Быков, Васильев, 1977].

¹⁷ rp5.ru

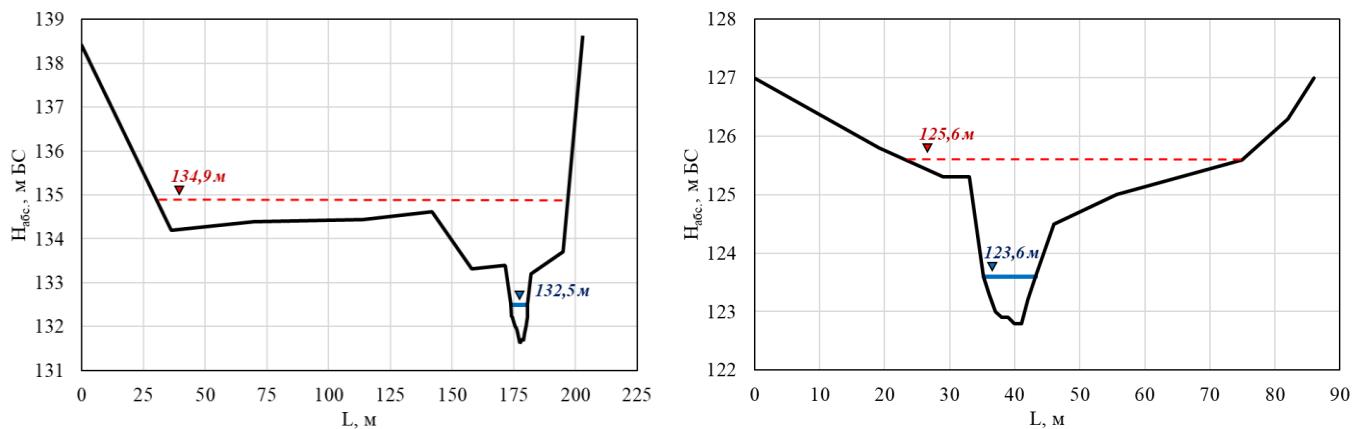


Рисунок 3.4. Профили морфостволов станции С3 (слева) и С5 (справа) (чёрная линия – отметки дна, синяя – уровень меженных вод, красная – максимальный зафиксированный уровень)

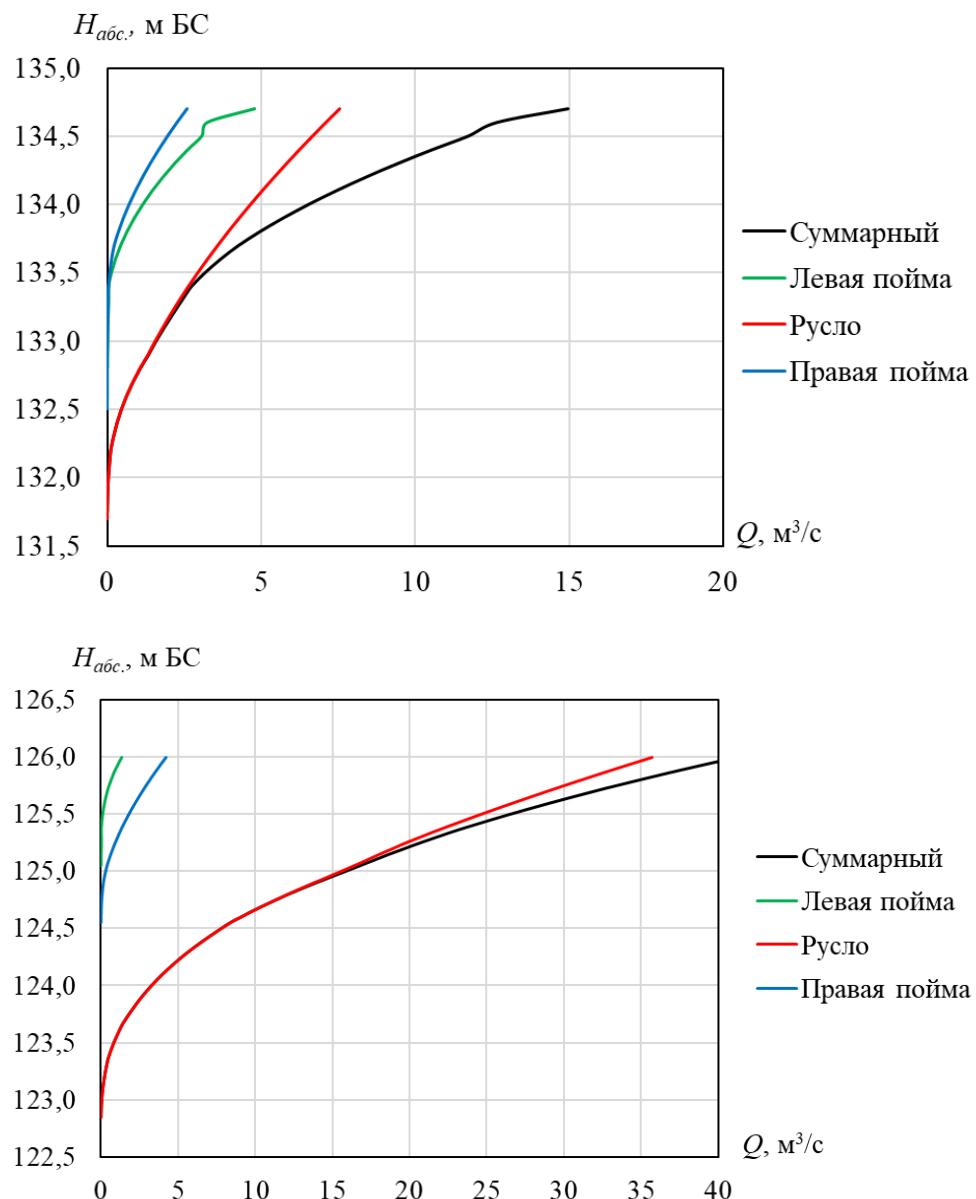


Рисунок 3.5. Совмещенные графики кривых $Q(H)$ для отсеков профиля и объединённая кривая для створа С3 (сверху) и С5 (снизу)

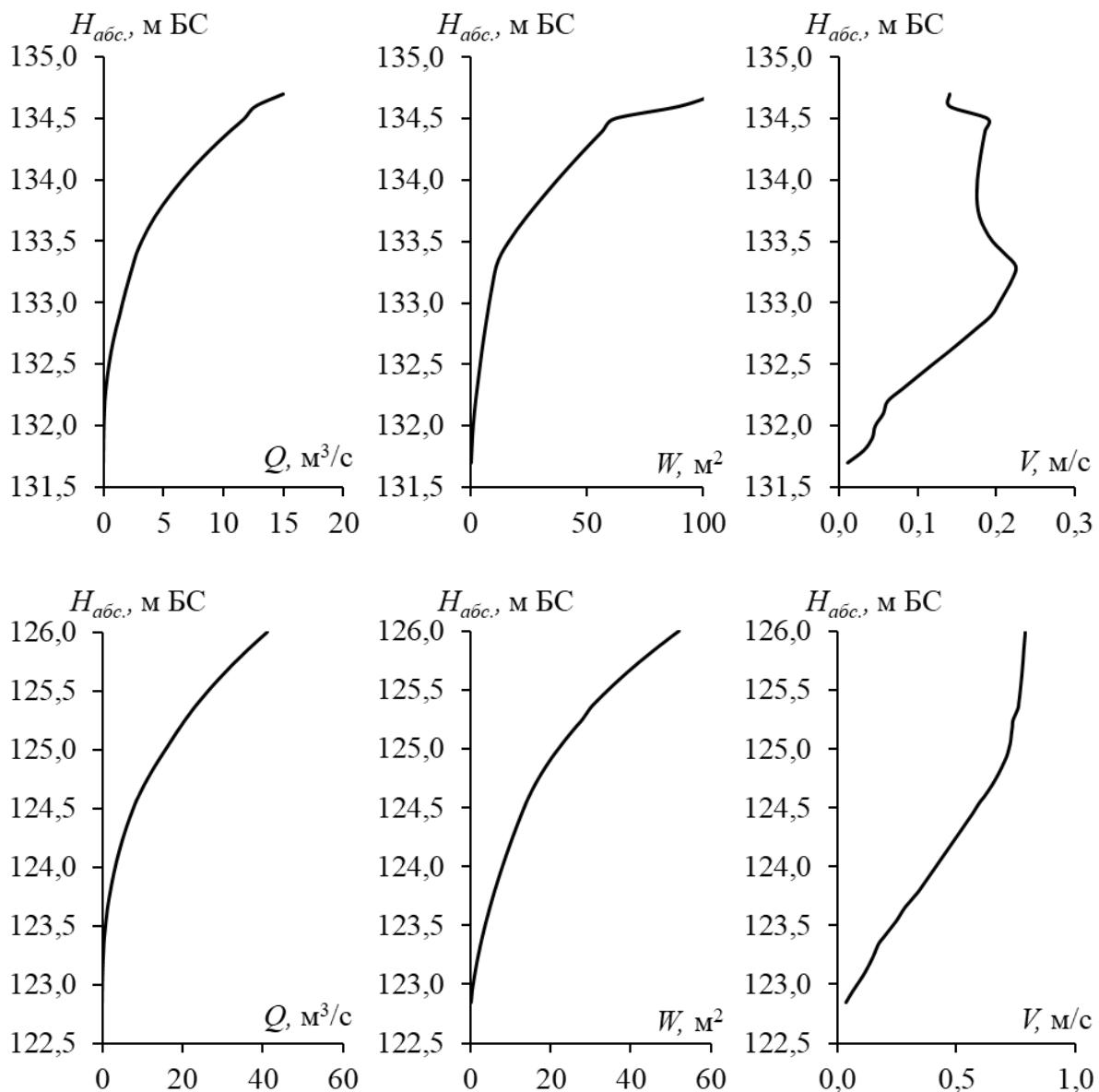


Рисунок 3.6. Кривые расходов ($Q, \text{m}^3/\text{c}$), площадей живого сечения (W, m^2) и средних скоростей течения ($V, \text{m/s}$) для створа C3 (сверху) и C5 (снизу)

Были установлены зависимости между уровнем (H , м) и расходом воды (Q , m^3/c). В среде Microsoft Excel эти зависимости были автоматически интерполированы, что позволило для каждого значения уровня получить соответствующее расчётное значение расхода воды. На основе данных измеренных расходов в каждой точке корректировались уклоны руслового сечения до достижения удовлетворительного соответствия между расчётной и измеренной кривыми расходов, обеспечивающего достоверность аппроксимации. По выверенным графикам (**Рисунок 3.7**) были рассчитаны 30-минутные расходы воды, при этом среднее квадратическое отклонение составило 6–9%, что свидетельствует о приемлемом уровне точности. Данные взаимосвязи демонстрируют высокую надёжность и применимость в диапазоне расходов

порядка 1,6 (С3) и 16 м³/с (С5), что соответствует установленным в гидрометрии критериям ограничения экстраполяции значений на уровне 10%.

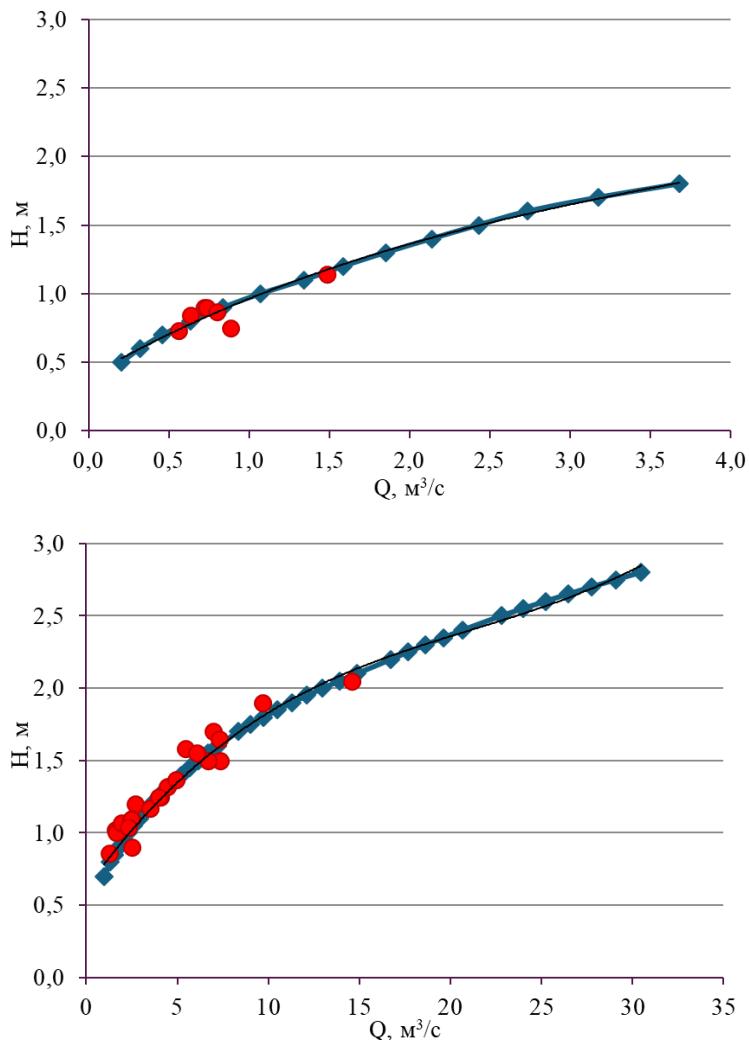


Рисунок 3.7. Зависимости между уровнем воды (H , м) и расходами воды (Q , м³/с) для створа С3 (сверху) и С5 (снизу) (красные точки – измеренные расходы, синие – расчётные)

3.2. Статистические операции

Для собранных рядов была проведена обработка при помощи фильтра Савитцки-Голея [Savitzky, Golay, 1964; Kong et al., 2022], реализованного в пакете phenofit языка программирования R, для удаления выбросов и сглаживания рядов (удаление краткосрочных и слабоинтенсивных колебаний расходов воды) (**Рисунок 3.8**). Фильтр Савитцки-Голея является алгоритмом обработки сигналов, который применяется к набору цифровых точек данных с целью их сглаживания без искажения тенденции сигнала. Он основан на методе наименьших квадратов, что позволяет аппроксимировать данные с помощью полинома. Основные параметры фильтра – ширина окна (определяет количество точек для сглаживания), порядок полинома (указывает степень полинома, который используется для аппроксимации данных в

пределах заданного окна) и коэффициенты свёртки (коэффициенты, рассчитываемые на основе уравнений наименьших квадратов) [Денисова и др., 2025].

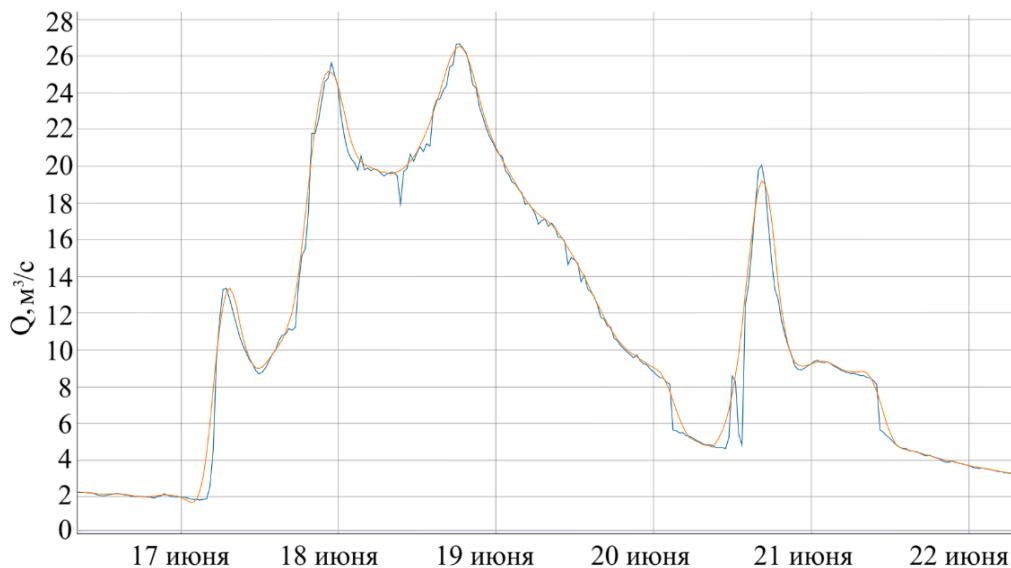


Рисунок 3.8. Пример сглаживания гидрографа (синяя линия – сырье данные, оранжевая – обработанные)

Для реализации данного метода использовались весовые коэффициенты, которые позволили определить значимость конкретной величины расхода для дальнейшего сглаживания: веса изменяются от 0 до 1, где 0 – это полное игнорирование значений. Для распределения весов по временным рядам с помощью ПО STATISTICA был определён размах (без выбросов) изменения расходов за единицу времени (30 мин). Сглаживание данных и удаление выбросов производилось, исходя из соображения, что расходы воды не могут резко понижаться и затем снова повышаться за единицу времени. Необходимо было определить отрицательные пики, то есть найти граничные значения между естественным падением расхода и искусственным. Значениям, выходящим за данный диапазон, присваивались веса, равные 0,2. В случае если встречалось 3 последовательных значения расхода с весом 0, то это определялось как выброс, их вес становился равным 0 [Денисова и др., 2025]. Результаты сглаживания гидрографов представлены на **Рисунке 3.9**.

Городские реки подвержены резким колебаниям уровня и расхода воды из-за ливневых стоков, сбросов коммунальных и промышленных вод. Согласно [Наставление гидрометеорологическим..., 1978] гидрологические наблюдения необходимо выполнять «Ежедневно в 08 и 20 ч по местному времени; в период половодья и дождевых паводков учащенно, по указанию гидрологической станции». Высокочастотные замеры (например, каждые 15–30 минут) позволяют фиксировать эти пиковые нагрузки. В рамках исследования был проведён анализ влияния разной частоты мониторинга на точность определения суточного

расхода воды, с использованием следующих вариантов: (1) данные утреннего измерения (8:00), (2) среднее значение двух замеров (8:00 и 20:00), (3) среднее по четырём временным точкам (8:00, 14:00, 20:00, 24:00), а также (4) среднее за сутки по фактическим данным логгера.

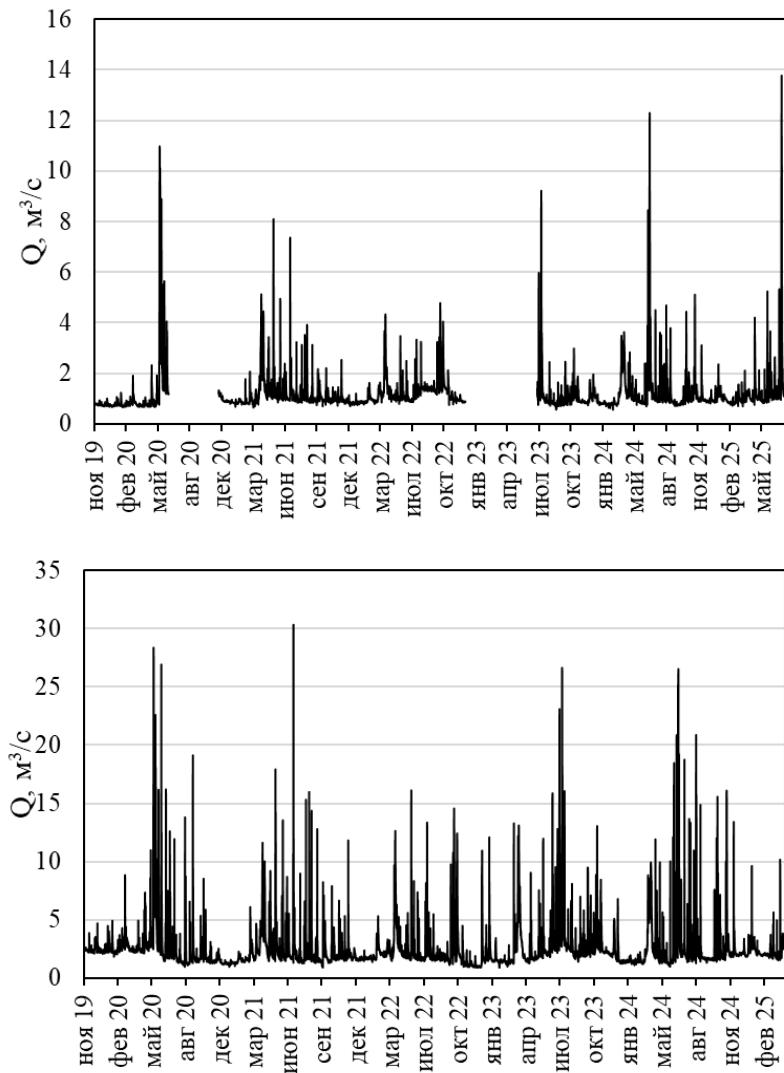


Рисунок 3.9. Расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$) на р. Сетунь (на основе данных о стоке за 2019–2025 гг.) в створе С3 (сверху) и С5 (снизу)

Абсолютные отклонения суточных расходов для поста С3 при одноразовом (в 8:00) и 48-разовом (1 раз в 30 минут) измерениях составляли от 0 до $6,2 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальное относительное отклонение (отношение абсолютного отклонения значения суточного расхода, определённого по разовым измерениям, к фактическому значению суточного расхода, полученному на основе высокочастотных данных) достигало 400%, в среднем варьируясь в диапазоне от 2 до 9%. Для поста С5 при однократном измерении (в 8 утра) и 48-разовом (1 раз в 30 мин) измерениях абсолютные отклонения суточных расходов достигали $11,9 \text{ м}^3/\text{с}$, при 2-разовом и 48-разовом – $4 \text{ м}^3/\text{с}$, а при 4-разовом – $2,7 \text{ м}^3/\text{с}$. Средние отклонения суточных расходов от значений высокочастотного мониторинга для поста С5 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 (**Рисунок 3.10, Таблица 3.2**).

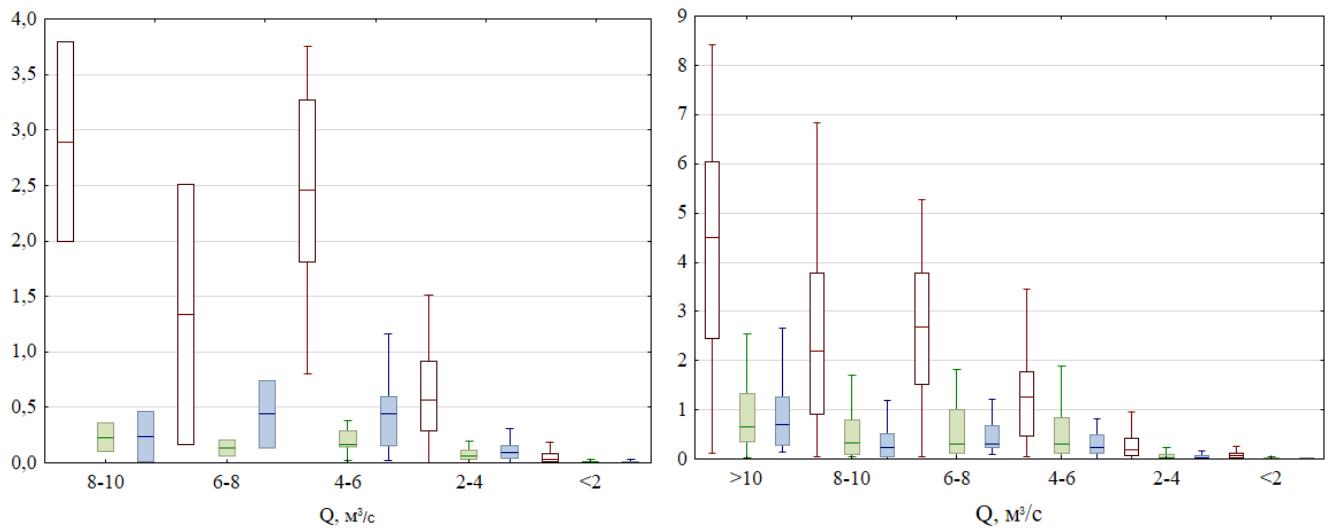


Рисунок 3.10. Разница между среднесуточным значением расхода воды при измерении в (1) 8 ч – 1 раз в день, (2) 8 и 20 ч – 2 раза в день, (4) 8, 14, 20, 24 ч – 4 раза в день, и фактическими измерениями при различных расходах воды в створе С3 (слева) и С5 (справа)

Таблица 3.2

Разница между среднесуточным значением расхода воды при различной частоте измерений

Пост	Q, м ³ /с	N	Среднее			Минимум			Максимум		
			1	2	4	1	2	4	1	2	4
C3	8–10	2	2,9	0,2	0,2	2,0	0,1	0,0	3,8	0,4	0,5
	6–8	2	1,3	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	2,5	0,2	0,7
	4–6	12	2,7	0,3	0,4	0,8	0,0	0,0	6,2	1,0	1,2
	2–4	70	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	4,8	1,0	0,5
	<2	1522	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,7	0,4
	Всего	1608	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	1,0	1,2
C5	>10	24	4,2	1,0	0,9	0,1	0,0	0,2	8,4	4,0	2,7
	8–10	22	2,8	0,5	0,4	0,0	0,0	0,0	11,4	1,7	1,3
	6–8	31	2,9	0,6	0,5	0,1	0,0	0,1	11,9	2,8	1,9
	4–6	89	1,3	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	4,8	3,7	1,5
	2–4	852	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	10,9	3,1	1,1
	<2	959	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,4	0,6	0,2
	Всего	1977	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	11,9	4,0	2,7

Значительное завышение фактического среднесуточного расхода воды возникает, когда в течение дня происходит паводок, который фиксируется только в одном из замеров расхода. Абсолютное отклонение суточных расходов 28.06.2021 при одноразовом (в 8 утра) и 48-разовом (1 раз в 30 минут) составило $8,8 \text{ м}^3/\text{с}$ (в 6 раз). При этом при измерениях 2 и 4 раза в день разница среднесуточных расходов составила $4,3$ и $4 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно (**Рисунок 3.11**).

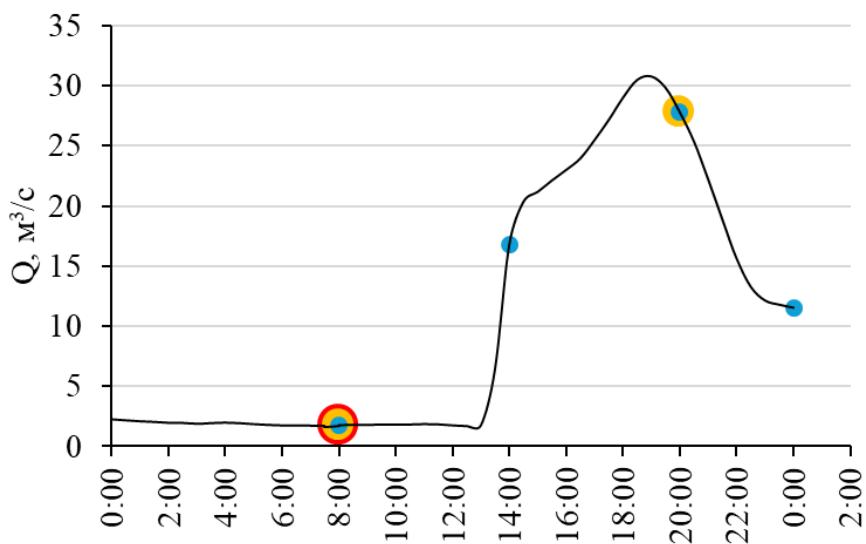


Рисунок 3.11. Гидрограф р. Сетунь (створ C5) 28.06.2021 и возможные оценки суточного расхода воды в случае измерения расходов в отдельные периоды суток (красная точка – измерения в 8:00, оранжевая – в 8:00 и 20:00, голубая – в 8:00, 14:00, 20:00, 24:00)

3.3. Валидация пиковых расходов

Данные о стоке р. Сетунь свидетельствуют о неустойчивом и нестационарном режиме течения с высокой частотой кратковременных паводков. Рост изменчивости уровня и расхода воды в реке является общей реакцией водосбора на урбанизацию – ускоренное добегание дождевых осадков до русла, сбросы с очистных сооружений, прудов и эпизодическое поступление воды из коллекторно-ливневой системы. В результате в течение года фиксировались короткие эпизоды резкого увеличения расходов воды со средней продолжительностью 3 часа, которые сопровождаются быстрым подъёмом уровня, достигающим в отдельных случаях 1,07 м за один час (например, 28.06.2021), что наблюдалось в данном исследовании. Подобные подъёмы расходов воды ранее не описывались для городских рек, поэтому отдельной методической задачей исследования стала их валидация.

Для проверки существования подобных быстрых изменений стока и исключения инструментальных ошибок, был проведён эксперимент по одновременной регистрации данных двумя логгерами в замыкающем створе (C5) р. Сетунь и фотофиксацией фотоловушкой. На **Рисунке 3.12** показана сравнительная динамика расхода воды с помощью датчиков моделей

НОВО U20L и Keller DCX-22-ECO, которые были установлены 14.11.2019 и 03.06.2023 соответственно. Летом 2023 г. на р. Сетунь было зафиксировано 13 резких увеличений расходов воды, подтверждённых одновременными показаниями двух логгеров. В среднем быстрые изменения расхода воды длились от 3 до 12 часов. Общий рост расходов в отдельных случаях составлял от 3 до 9,5 раз по сравнению с базовым.

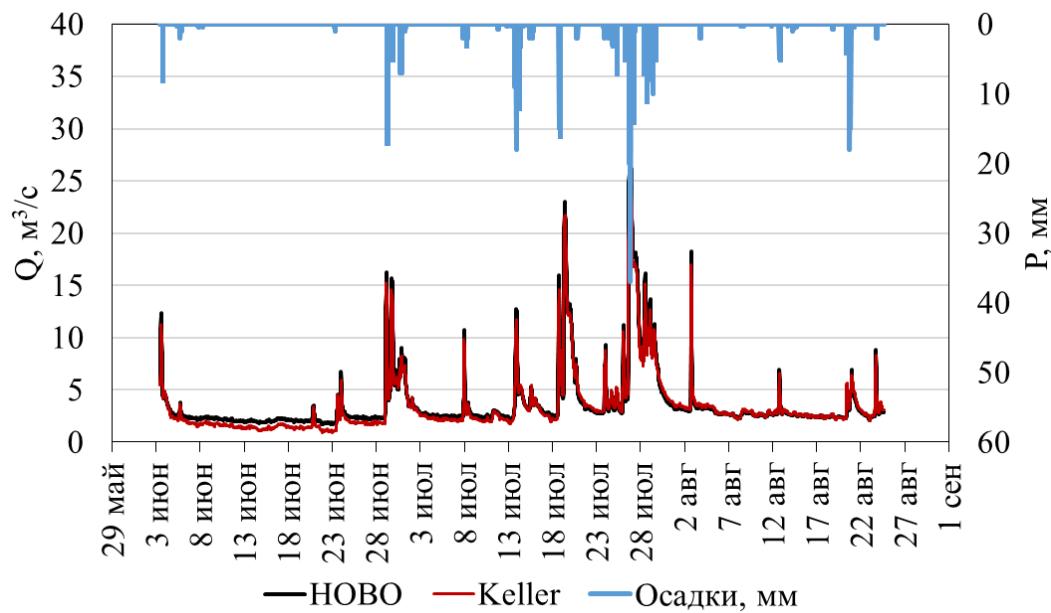


Рисунок 3.12. Ход расходов и осадков в створе C5 за период с 03.06.2023 по 24.08.2023 (красная линия – данные, полученные с помощью датчика Keller, чёрная линия – данные, полученные с помощью датчика НОВО, синяя линия – количество осадков на метеорологической станции Балчуг¹⁸⁾

Пики на гидрографе совпадали у обоих датчиков, что исключает инструментальную ошибку измерений. Одновременно, совмещённые с ходом расходов данные об осадках подтверждают вклад дождевого питания в формирование коротких паводков на территории бассейна. Отдельные пики могут существенно трансформироваться и по другим причинам, указанным выше (бросы с очистных сооружений, прудов, эпизодическое поступление вод из коллекторно-ливневой системы). Так, в районе створа C5 регулярно наблюдалось крайне нестационарное поступление вод по трубе в р. Сетунь (**см. Рисунок 3.3**).

В ходе мониторинговой кампании в створе C5 была установлена фотоловушка Seelock-S378 (**Рисунок 3.13**). Данные, полученные с помощью фотоловушки, также являются одним из способов визуальной проверки резких скачков уровней и, как следствие, расходов воды.

¹⁸ rp5.ru

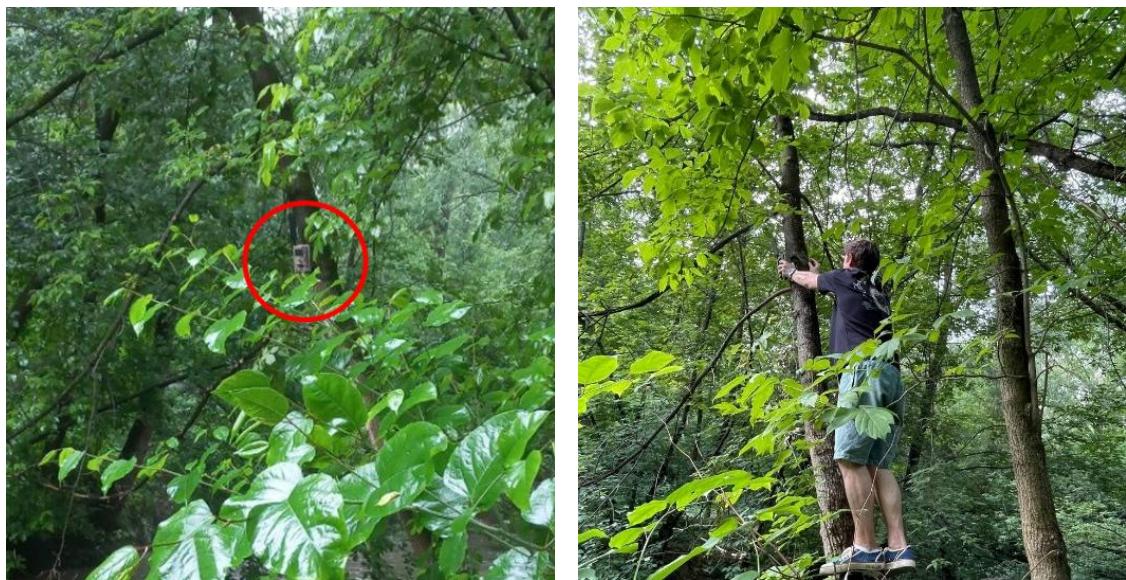


Рисунок 3.13. Установка фотоловушки Seelock S378 в точке С5 (фото автора)

Был рассмотрен паводок, прошедший 29.06.2023 (**Рисунок 3.14, 3.15**): наблюдался резкий рост расходов до 11,229 и 10,239 м³/с в 5:30 (для логгеров НОВО и Keller соответственно) (**Рисунок 3.14а**), затем – спад до 4,515 и 4,499 м³/с в 11:30 (**Рисунок 3.14б**), после чего снова следовал подъём до 15,673 и 14,772 м³/с в 17:30 (**Рисунок 3.14в**). Эти тенденции согласуются с данными об осадках, что подтверждается визуальной оценкой изображений, на которых виден кратковременный подъём уровня воды.

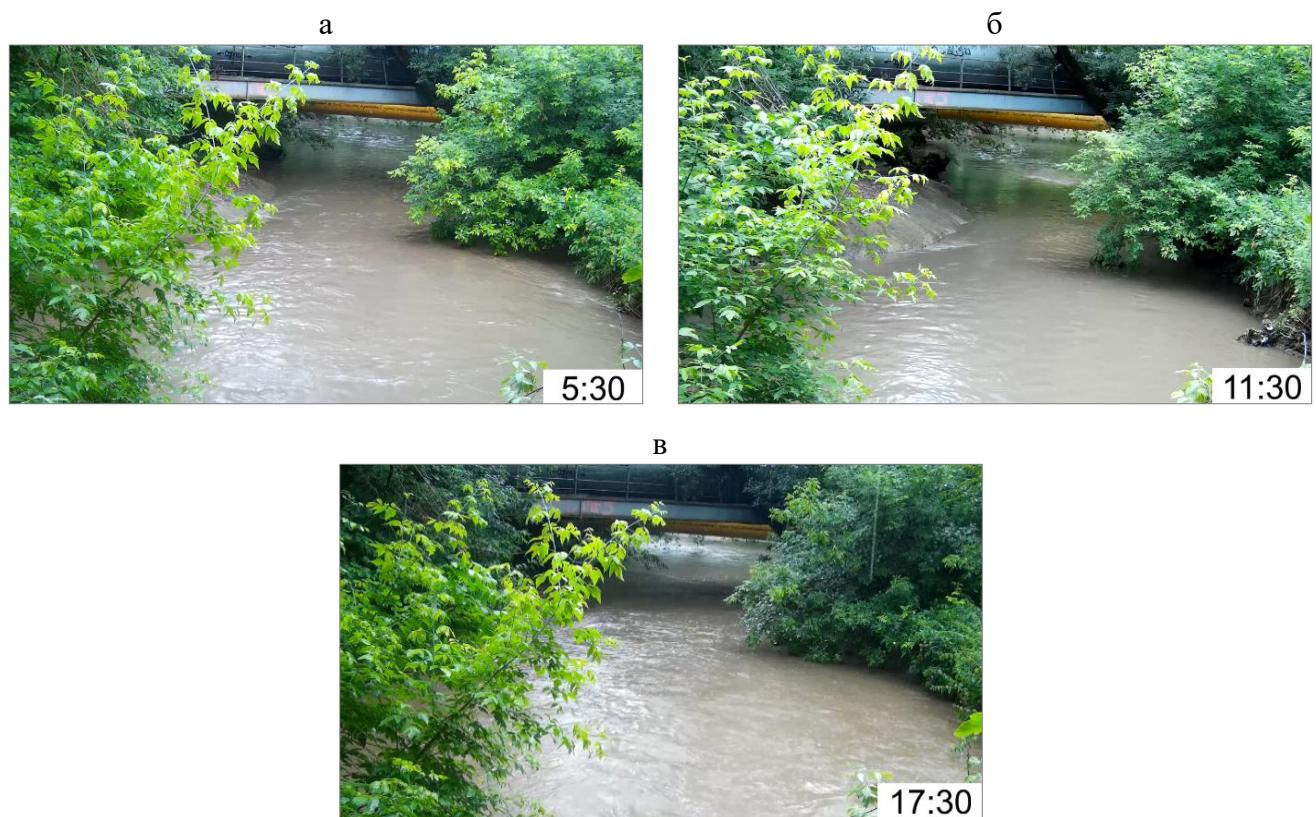


Рисунок 3.14. Снимки, полученные с помощью фотоловушки в створе С5 29.06.2023

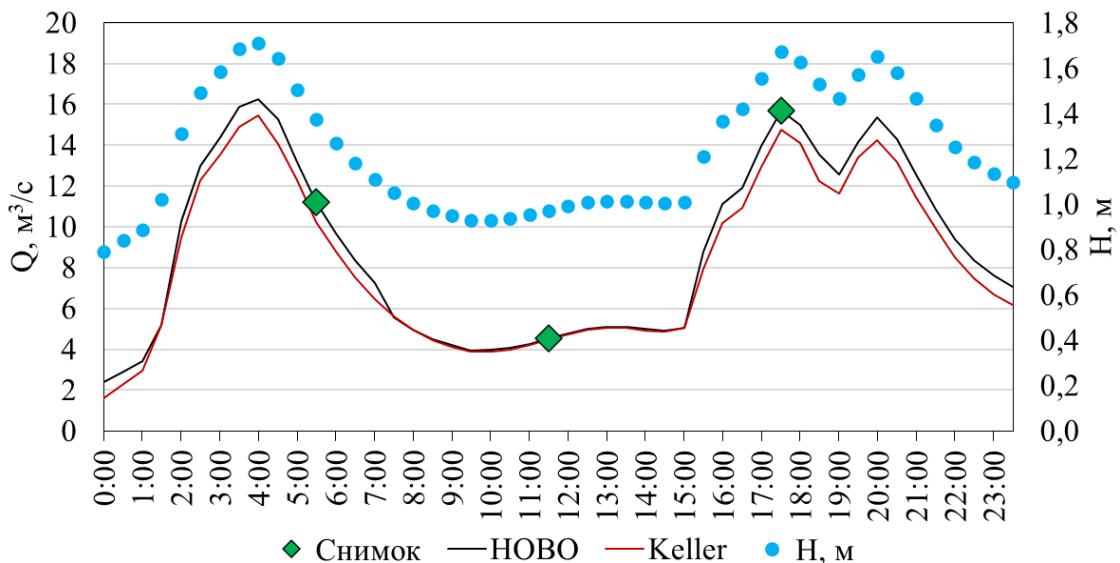


Рисунок 3.15. Гидрограф р. Сетунь в створе C5 29.06.2023

Для определения природы резких выбросов был также проведен сравнительный анализ использованного для пересчёта давления с метеостанции Балчуг с данными давления на МО МГУ, ВДНХ, Внуково и Немчиновке (Рисунок 3.16). Далее ряды были сопоставлены с сырьим давлением, записанным логгером в створе C5. Оценка проведена в рамках 30-минутных интервалов с ноября 2019 г. по апрель 2023 г. Для корреляционного анализа был посчитан коэффициент корреляции (Таблица 3.3) при уровне значимости $p\text{-value}$, равном 0,05. Если значение $p\text{-value}$ было $>0,05$, то нулевая гипотеза принималась.

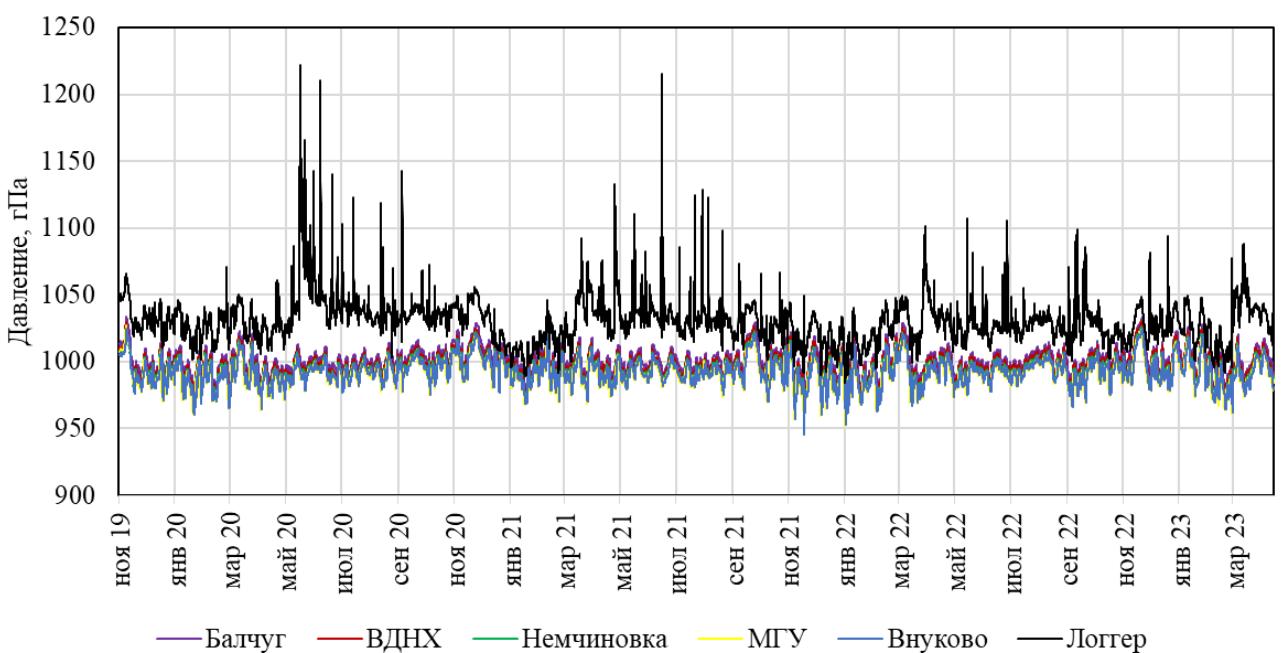


Рисунок 3.16. Давление на метеостанциях Москвы и полученное с помощью логгера в створе C5

Таблица 3.3

Коэффициенты корреляции для рядов давления на метеостанциях и записанного логгером
в створе С5

	Внуково	Балчуг	МГУ	ВДНХ	Немчиновка	Логгер
Внуково	1	0,998	0,997	0,997	0,998	0,43
Балчуг	0,998	1	0,996	0,997	0,999	0,43
МГУ	0,997	0,996	1	0,998	0,996	0,44
ВДНХ	0,997	0,997	0,998	1	0,997	0,42
Немчиновка	0,998	0,999	0,996	0,997	1	0,43
Логгер	0,43	0,43	0,44	0,42	0,43	1

Выбор метеорологических станций для анализа основывался на их корреляции с данными по уровню воды и атмосферному давлению в створе С5 (см. Таблицу 3.3). Для всех станций была выявлена сильная корреляция ($>0,99$), однако ряды давления, полученные с помощью логгера, показали среднюю связь со всеми метеостанциями. Можно сделать вывод о том, что наличие ярко выраженных пиков не связано с неверным выбором метеостанции для пересчёта давления в уровни. Это объясняет, почему значительные кратковременные высокие расходы воды могут быть связаны как с ливнями [Чалов и др., 2023а], так и с другими факторами, например, вследствие попусков воды из небольших резервуаров, которые в основном расположены в верхних частях водосбора. Валидация подтвердила существование пиковых расходов, методическую корректность их регистрации с помощью барометрических логгеров и возможность применения этих данных для дальнейшего анализа, представленного в Главе 4.

3.4. Методика расчленения гидрографа GrWat

Для станций и лет, где имелся достаточно продолжительный круглогодичный ряд измерений (для створа С3 – 2021–2022, 2024 гг. и для створа С5 – 2020–2024 гг.), проводилось выделение ФВР путём реализации алгоритма автоматизированного расчленения гидрографа GrWat, определяющего подземную составляющую стока, весенне половодье и паводки (дождевые и оттепельные) [Рец и др., 2022]. В основу модели заложен подход, предложенный Б.И. Куделиным [Куделин, 1960]: во время подъёма уровня речные воды создают подпор связанным с ними грунтовым водам, подземное питание резко уменьшается и на пике половодья принимается равным нулю. На спаде половодья воды из водоносных слоев вновь начинают поступать в русло, подземное питание восстанавливается. Задача была реализована на языке программирования R с программным пакетом grwat¹⁹, при этом значения расхода воды

¹⁹ Samsonov T (2024). grwat: River Hydrograph Separation and Analysis. R package version 0.0.4.9000, <https://tsamsonov.github.io/grwat/>, <https://github.com/tsamsonov/grwat>.

были получены путём обработки данных логгеров, а также метеорологических данных, содержащих суточное количество осадков (в мм) и суточные температуры (в $^{\circ}\text{C}$), полученных с метеостанций МГУ, Немчиновки и Внуково методом кригинга (**см. Раздел 3.5**) (**Рисунок 3.17**).

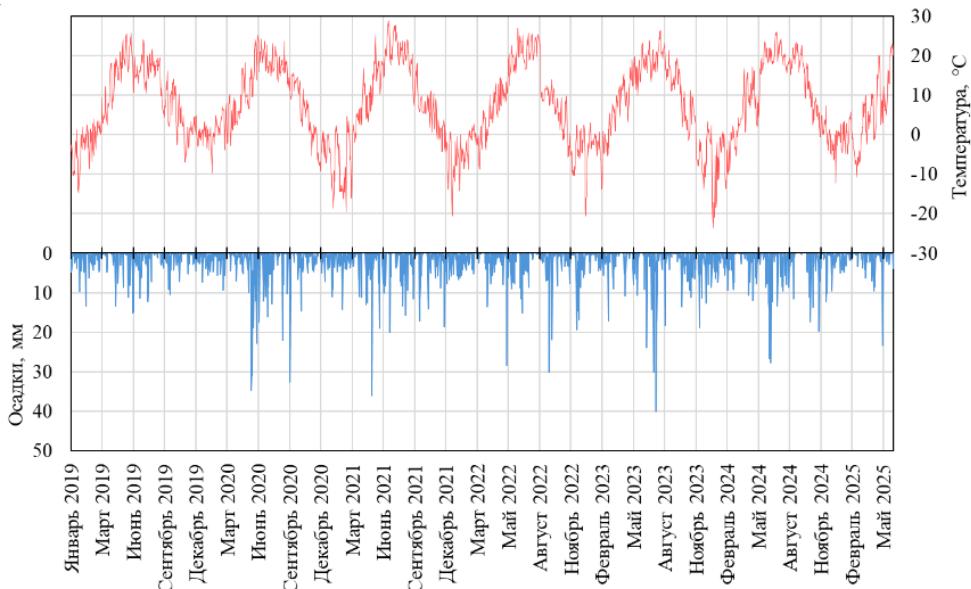


Рисунок 3.17. Среднесуточная сумма осадков (мм) (левая ось) и температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) (правая ось), полученные с метеостанций МГУ, Немчиновка и Внуково методом кригинга, в 2019–2025 гг.

В программном пакете все данные были приведены к ежедневным наблюдениям, которые затем были разделены на водохозяйственные годы. Каждый год отсчитывается с начала половодья в текущем календарном году до начала половодья в следующем году. Выходные данные содержат информацию о расчётом базисном стоке, быстром стоке весенней (талой) составляющей, быстром стоке дождевых и оттепельных паводков, а также о характеристиках водного режима [Чижова и др., 2021; Рец и др., 2022]. Данный метод основан на предположении, что реакция базисного стока на осадки или снеготаяние возникает гораздо медленнее по сравнению с быстрым стоком. Основным калибровочным параметром модели является интенсивность спада/подъёма расхода воды за счёт базисной составляющей, что соответствует концепции кривых спада базисного стока. В условиях преобразованного водного режима р. Сетунь под ним (базисным стоком) 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.). Начало и конец оттепельных и дождевых паводков в период зимней и летней межени определяются в модели по резкому градиенту изменения расхода воды, отделение паводка выполняется по линейной интерполяции. В модели отчленение паводковых событий

выполняется по хорде, проведённой от точки резкого увеличения расходов воды до точки перегиба на гидрографе, где начинается тенденция к снижению расхода воды [Киреева и др., 2019]. Интенсивность спада/подъёма расхода воды за счёт базисной составляющей варьировалась (grad1) в диапазоне от 0,5 до 3,5% сут $^{-1}$, аналогичный параметр для периода спада половодья (grad2) составил от 0,5 до 5% сут $^{-1}$; количество дней с начала половодья, за которое проходит основная волна половодья, составило от 5 до 30 дней; количество дней с даты максимального расхода, в течение которых действует grad2 перед переходом на grad1 – от 5 до 20 дней [Денисова и др., 2025].

3.5. Обработка метеорологических данных

Для характеристики осадков использованы данные об их интенсивности с дискретностью 10 мин, полученные с МО МГУ, оснащённой плювиографом (осадкомером). Для достоверного результата необходимы подробные сведения о пространственном распределении осадков, так как с использованием данных одной метеостанции невозможно воспроизвести неравномерность их выпадения. В исследовании была предложена альтернативная методика – использование метода кригинга. Срочные данные, полученные с ближайших метеостанций (МО МГУ, Внуково, Немчиновка)²⁰, были интерполированы в центроид водосбора р. Сетунь методом универсального кригинга²¹ [Терский и др., 2023]. Полученные 3-часовые данные об осадках были приведены к данным плювиограмм, записанных на МО МГУ, с помощью коэффициента пересчёта (Рисунок 3.18), который подбирался для каждого случая отдельно.

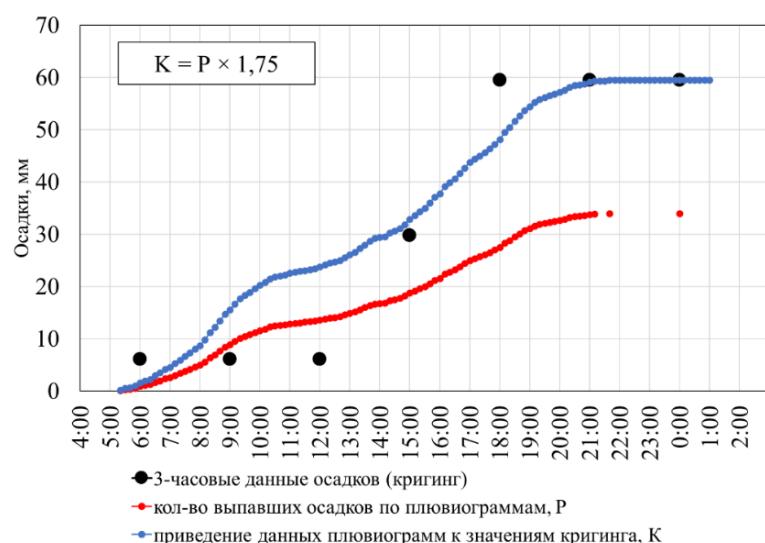


Рисунок 3.18. Приведение данных плювиограмм, записанных на МО МГУ, к значениям кригинга за 08.05.2021

²⁰ rp5.ru

²¹ <https://github.com/atsyplenkov/setun-meteo-kriging.git>

Анализ данных, полученных на сети метеорологических станций, остаётся ведущим методом мониторинга городского климата и оценки его изменений. Однако существует ряд ограничений, связанных с обычно небольшим количеством метеостанций в пределах города, в частности в Москве. В основу моделирования в настоящем исследовании были заложены имеющиеся данные лишь одной метеорологической обсерватории (МГУ), которые во многом характеризуют микроклиматические условия конкретной части города, однако не репрезентативны для других районов Москвы ввиду особенностей застройки территории, планировки города и рельефа, а также гидрографии [Кислов, 2017].

Для более высокой точности пространственного распределения осадков необходимо привлекать данные радиолокационных наблюдений с помощью сети доплеровских метеорологических радиолокаторов Росгидромета (ДМРЛ). Для оперативного мониторинга интенсивности осадков в настоящее время широко используются технологии научастинга – краткосрочного прогноза погоды на ближайшие часы с использованием данных радиолокационного и спутникового наблюдения высокого разрешения. Интенсивности осадков (в мм/ч) в данной работе были получены путём реализации двух программ на языке программирования Python, описанных в исследовании [Михайлова, Овчинникова, 2024]. Разработанные программы способны автоматически загружать данные с сайта Гидрометцентра²² на интересующую пользователя область карты; итоговый результат представлен в виде серии растровых изображений, где в каждом пикселе закодированы данные о минимальной часовой интенсивности осадков для текущего момента и прогноза на ближайшие 2 часа, при этом карты обновляются с интервалом в 10 минут. Пространственное разрешение сетки составляет 1×1 км, временное – 10 мин.

Точность этих данных ограничена несколькими факторами: пространственной неоднородностью осадков, плотностью сети радиолокаторов и метеостанций, а также особенностями обработки радиолокационных сигналов. Часто погрешности возникают при оценке интенсивности и распределения осадков за короткие временные интервалы и на малых площадях. Также стоит учитывать, что на зону осадков может оказывать значительное влияние и сама Московская агломерация, активизируя или размывая её в зависимости от интенсивности атмосферного фронта, времени суток и направления перемещения. По этой причине модель не всегда точно может спрогнозировать трансформацию зоны осадков [Дмитриева и др., 2023].

В пределах бассейна р. Сетунь попадает 177 ячеек с шагом сетки 1 км, характеризующих интенсивность осадков (**Рисунок 3.19**). Анализ временных рядов проводился для 2022–2024 гг. (апрель–ноябрь) для всех узлов, попадающих в границы бассейна (**см. Главу 6**).

²² <https://meteoinfo.ru>

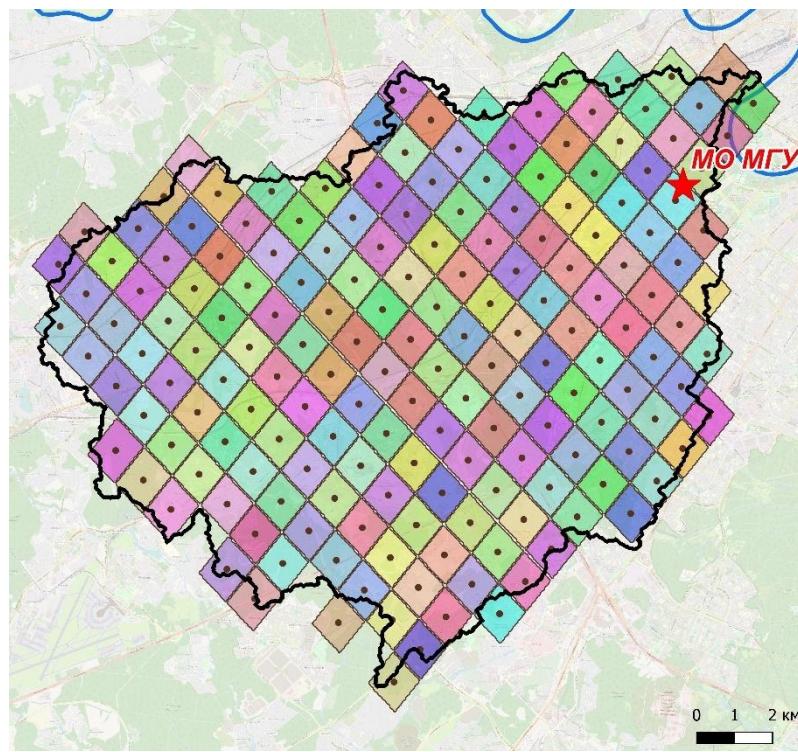


Рисунок 3.19. Водосбор р. Сетунь с указанием модельных узлов, покрытых данными ДМРЛ, с шагом сетки 1×1 км

Были рассчитаны коэффициенты корреляции для интенсивностей осадков в период с 2022–2023 гг. в зависимости от расстояния между узлами сетки за различные интервалы: 10 мин, 20 мин, 3 ч, 6 ч, 24 ч. Далее проводилась подгонка аппроксимации для всего интервала расстояний для каждого времени суммирования осадков отдельно, определялась однородность пространственных корреляционных функций.

Согласно работе [Гандин, Каган, 1976], требование репрезентативности данных измерений означает, что измерения в пункте должны с надлежащей точностью характеризовать значения измеряемой величины на окружающей территории. Её количественная характеристика определяется способом, который используется для распространения точечных данных, т.е. в качестве критерия принимается точность их интерполяции. В случае, когда эмпирическая пространственная корреляционная функция осредняемой величины описывается экспоненциальной зависимостью (3.3):

$$\mu(p) = e^{-p/l_0} \quad (3.3)$$

Погрешность, с которой значения на станции характеризуют среднее на окружающей территории площадью s , определяется формулой (3.4):

$$E(1, s) = \sigma \sqrt{0,23 \frac{\sqrt{s}}{l_0} + \eta^2} \quad (3.4)$$

где s – площадь территории, км^2 ; σ – среднеквадратическое отклонение; l_0 – расстояние, км ; η – мера ошибки наблюдения.

3.6. Методы анализа стока взвешенных наносов

Данные о мутности воды в створе С5 р. Сетунь записывались автоматическими логгерами, основанными на нефелометрическом принципе (**Таблица 3.4**), на протяжении двух периодов: (1) логгер Analite NEP-495, период с 16 ноября 2019 г. по 19 марта 2020 г., частота записи 10 минут (далее – Ряд 1); (2) логгер In-Situ Aqua Troll 600, период с 1 марта 2021 г. по апрель 2021 г. и с июля 2021 г. по октябрь 2021 г., частота записи 1 минута (далее – Ряд 2).

Таблица 3.4

Технические характеристики моделей регистраторов мутности

Обозначение	Ряд 1	Ряд 2
Название модели	ANALITE NEP-495	In-Situ Aqua TROLL 600
Измеряемые параметры	Оптическая мутность, температура воды	Оптическая мутность, температура воды
Диапазон измеряемой мутности, NTU*	0 – 5000	0 – 4000
Погрешность определения	± 1%	± 2%
Частота записи использованная (возможная)	10 минут (1 сек – 18 ч)	1 минута (1 мин – 99 ч)
Период записи	16.11.2019 – 19.03.2020	01.03.2021 – 29.10.2021

*NTU – нефелометрические единицы измерения оптической мутности потока.

Нефелометрический метод определения мутности речных вод базируется на способности взвешенных частиц рассеивать световое излучение, проходящее через единицу объёма воды: чем сильнее затухание светового потока с известными характеристиками, которое регистрирует один или несколько датчиков излучения, тем больше содержание в воде взвешенных частиц [Чалов и др., 2023б]. Современные *in situ* датчики используют этот эффект: приёмные датчики помещаются в водный объект, а их детекторы располагаются под различными углами к источнику излучения, что позволяет определить степень рассеяния светового пучка. Регистрируемое на датчиках излучения изменение светового потока калибруется относительно стандартных растворов, что позволяет получить универсальное уравнение преобразования для достаточно широкого диапазона изменения мутности (от 0 до 4000 NTU [Droujko, Molnar, 2022]). Преимуществами такого метода являются: быстрое получение величины мутности, мобильность, возможность проведения непрерывного мониторинга мутности с высокой частотой измерений [Промахова, Чалов, 2015].

Первичное сглаживание данных производилось с помощью фильтра Савитцки-Голея, который упоминался ранее в **Разделе 3.2**. Из рядов удалялись бракованные участки записей, в которых значения мутности резко аномально повышались. Основная причина появления таких участков заключается в заилиении датчиков, при котором на чувствительных элементах прибора

накапливаются глинисто-илистые частицы, несмотря на периодически проводимую очистку [Чалов и др., 2023б]. Были получены основные характеристики высокочастотных рядов наблюдений, разделённые на отрезки с удалёнными (отбракованными) участками (**Таблица 3.5**).

Таблица 3.5

Основные характеристики высокочастотных рядов наблюдений

Период	2019–2020 часть 1	2019–2020 часть 2	2019–2020 полный	2021 часть 1	2021 часть 2	2021 полный
Начало периода	05.12.19 9:00	31.12.19 7:00	05.12.19 9:00	09.03. 11:45	22.07 14:41	01.03 10:00
Конец периода	24.12.19 19:00	29.01.20 6:50	29.01.20 6:50	03.05 22:30	28.10 7:53	28.10 7:53
Продолжительность, сут.	19	29	48	51	93	144
Средняя мутность, NTU	54,09	26,37	37,49	80,99	31,61	47,19
Минимальная мутность, NTU	36,11	2,33	2,33	0,00	0,01	0,00
Максимальная мутность, NTU	90,4	81,03	90,4	1692,5	1359,9	1692,5
Средний расход воды, м ³ /с	2,51	2,39	2,44	3,20	2,03	2,51
Минимальный расход воды, м ³ /с	2,07	2,05	2,05	1,44	0,93	0,93
Максимальный расход воды, м ³ /с	5,10	4,62	5,10	11,74	16,82	30,76

Регулярные измерения весовой мутности выполнялись в период с 2019 по 2023 годы в р. Сетунь на основе пробоотбора воды, а также измерение оптической мутности воды портативными зондами YSI ProSolo и ProDSS (см. **Рисунок 3.1**) на 7 станциях мониторинга. Станции С1 и С6 расположены в верховьях р. Сетунь – наименее урбанизированных участках, хотя и подвержены потенциальному воздействию полигона твёрдых бытовых отходов (ТБО) «Саларьево». Станции С2 и С7 находятся выше и ниже МКАД соответственно. Станция С8 расположена ниже промзоны «Очаково» и ниже впадения притока р. Навершки. Станция С9 расположена ниже пересечения реки с железной дорогой, крупными автомагистралями и впадения р. Раменки, что отражает совокупное воздействие транспортных коридоров и прилегающих урбанизированных территорий. Замыкающая станция С10 находится в 1 км от устья р. Сетунь [Терешина и др., 2021].

Следует подчеркнуть, что данные по ВВ, полученные на станции мониторинга С10, сопоставимы с результатами измерений на гидрологическом посту С5, где также использовался логгер мутности, а станции С1 и С2 совпадают с гидрологическими постами С1 и С2

соответственно. Всего на станциях мониторинга было проанализировано 195 проб воды в различные ФВР: по 19 образцов в каждом из створов C1, C2, C6–C9 и 81 образец в створе C10. В 2021 г. пробоотбор проводился ежедневно в периоды половодья и паводков (Рисунок 3.20).

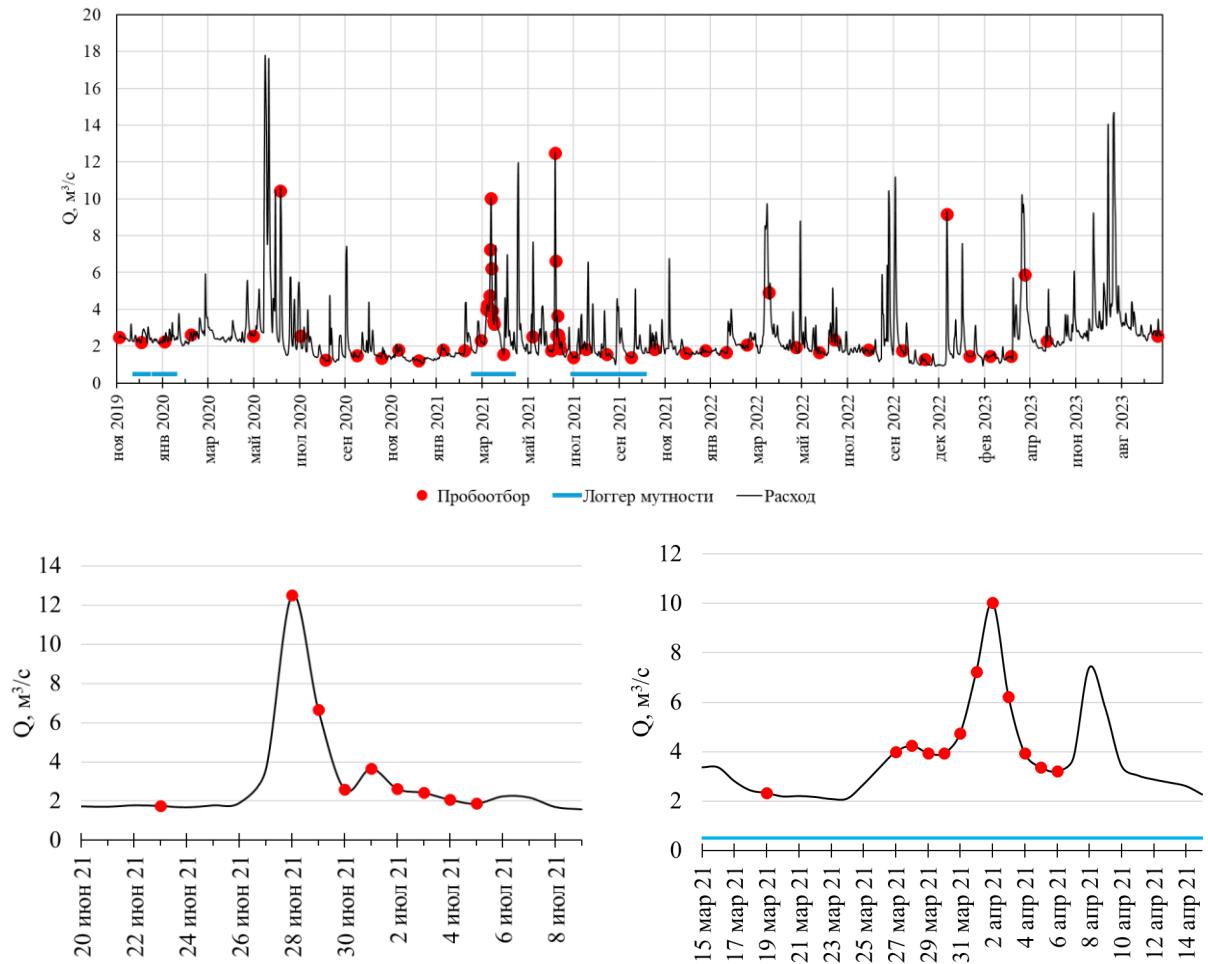


Рисунок 3.20. Пробоотбор в р. Сетунь в 2019–2023 гг. (створ C10)

Образцы воды были профильтрованы через стандартные мембранные фильтры Millipore с диаметром пор 0,45 мкм. Фильтрация проб объёмом 1–1,5 л выполнялась на вакуумной фильтровальной установке, после чего фильтры высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С для последующего определения весовой мутности воды [Наставление гидрометеорологическим..., 1978].

Гранулометрический состав взвешенных наносов определялся методом лазерной дифракции с использованием лазерного гранулометра Fritsch Analysette 22. Применение лазерного гранулометрического анализа значительно сокращает время определения концентраций различных фракций взвешенных частиц по сравнению с традиционными методами. Для подготовки проб требовалось предварительное диспергирование осадка с фильтров в 4% растворе пирофосфата натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), что способствовало разрушению агрегатов частиц и улучшению точности результатов. К недостаткам данного метода относятся

возможные ошибки, обусловленные наличием единичных крупных частиц, которые при прохождении через пучок света могут привести к искажению результата на 10–15%. Однако при проведении серии из 3–6 повторных измерений точность существенно повышается, и погрешность снижается [Ефимов, 2023].

Гранулометрический состав наносов определялся размером (диаметром) частиц d (мм), то есть распределением массовых долей фракций различной крупности d_i (%). Наиболее информативным параметром является медианный диаметр частиц (или средняя крупность) d_{50} (мм), который разделяет пробу наносов общей массой m_s на две равные по весу части. Величина d_{50} рассчитывается исходя из соотношения масс отдельных фракций m_i , характеризующихся средним диаметром частиц d_{0i} , по выражению (3.5):

$$d_{50} = \frac{\sum_i m_i d_{0i}}{m_s} \quad (3.5)$$

Глава 4. Эмпирическая оценка водного стока в малых реках.

Обработка сетевых наблюдений

Проведённый в Главе 3 комплексный анализ методик наблюдения и обработки данных по гидрологическому режиму бассейна р. Сетунь позволил сформировать достоверные ряды высокочастотных наблюдений. Реализация системы мониторинга с применением современных автоматизированных датчиков обеспечила получение репрезентативных данных, максимально полно отражающих динамику гидрологических процессов в условиях урбанизированной среды. Использование описанных подходов стало ключевым условием для перехода от методологических основ к эмпирической оценке водного стока р. Сетунь и его многолетних изменений.

4.1. Оценка многолетних изменений стока

Оценка многолетних изменений стока для р. Сетунь выполнена на основе сравнения с данными по ведомственному расходному гидрометрическому посту на территории завода «Сложные эфиры», входящему в структуру Росгидромета [Терский и др., 2023], функционирующему с 1979 г. в устье р. Сетунь. Данные, полученные на нём, были использованы для ретроспективного анализа годового стока за 1979–1988 гг. (за исключением 1982 и 1986 гг.). За период 1979–1988 гг. средняя величина слоя годового стока р. Сетунь составила 472 мм (Таблица 4.1). При этом от года к году слой стока изменялся незначительно, и отклонения наибольшего (533 мм) и наименьшего (438 мм) значения от среднего невелики. Определённый по данным об осадках с МО МГУ коэффициент годового стока р. Сетунь η в среднем за исследуемый период оказался равен 0,68. При этом в течение периода прослеживается увеличение коэффициента стока от 0,55 до 0,80, что вероятно связано с увеличением площади застройки территории водосбора и с увеличением объёма сбросов сточных вод предприятиями.

Таблица 4.1

Характеристики годового стока р. Сетунь за период 1979–1988 гг.

Год	Слой стока, мм	Слой осадков, мм	Коэффициент стока η	$Q_{ср.}, \text{м}^3/\text{с}$
1979	447,4	687,5	0,65	2,70
1980	438,6	797,6	0,55	2,64
1981	471,4	782,4	0,60	2,84
1983	533,7	703,9	0,76	3,22
1984	455,0	601,4	0,76	2,74
1985	484,3	763,5	0,63	2,92
1987	463,1	577,8	0,80	2,79
1988	486,4	700,4	0,69	2,93
Среднее	472,5	701,8	0,68	2,85

Анализ осреднённых суточных гидрографов, построенных по данным поста С5 за 2019–2024 гг. (с использованием измерений в 8:00) и поста «Сложные эфиры» за 1979–1988 гг. (**Рисунок 4.1**), показал снижение среднегодового расхода воды на р. Сетунь в современный период на 16,5% по сравнению с предыдущим этапом наблюдения (с $2,85 \text{ м}^3/\text{с}$ до $2,38 \text{ м}^3/\text{с}$).

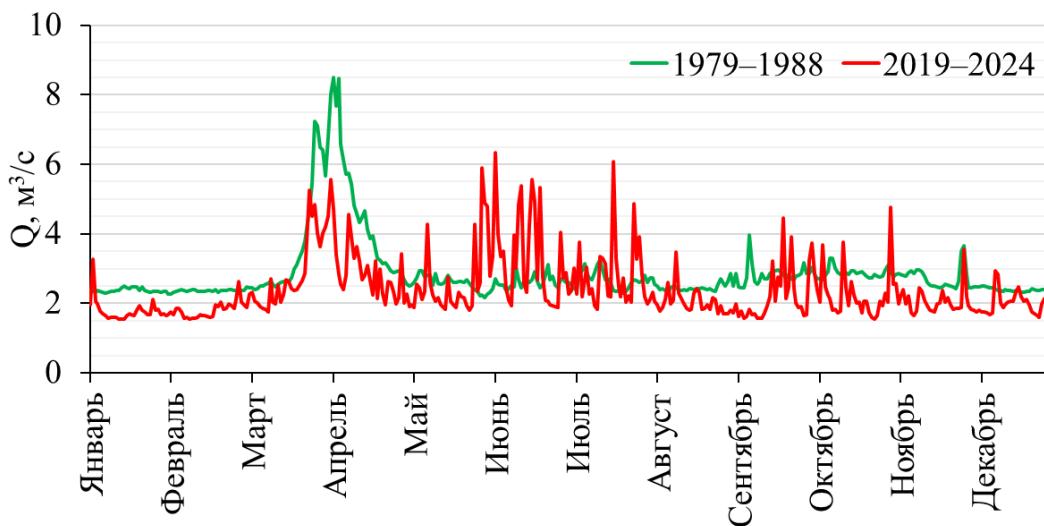


Рисунок 4.1. Осреднённые суточные гидрографы р. Сетунь по г.п. Сложные Эфиры (1979–1988 гг.) и посту С5 сети наблюдений МГУ (2019–2024 гг.) (суточные расходы определены по измерениям в 8:00)

Различия в методике измерений (одно измерение в сутки вместо 48 измерений) могут влиять на расчёт среднесуточного расхода. Для оценки этого влияния проведено сравнение расходов по 30-минутным данным и по одному замеру (8:00) за 2019–2024 гг. Максимальная разница составила $2,54 \text{ м}^3/\text{с}$, тогда как среднее расхождение по всему ряду – $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$. Поскольку наблюдаемое снижение составило $0,47 \text{ м}^3/\text{с}$, влияние разницы в частоте наблюдений оказывается несущественным для общей динамики. Несмотря на это, из-за относительно короткого современного ряда полученные результаты требуют дополнительного подтверждения при расширении временного интервала наблюдений.

Главным фактором, определяющим изменения гидрологических характеристик водосбора, является степень урбанизированности территории, которая в последние годы постоянно увеличивается. С использованием архивных карт Генерального штаба за 1985 г. масштаба 1:100 000²³ (**Рисунок 4.2**) было выявлено, что площадь селитебных территорий увеличилась с полученными оценками за 2024 г. приблизительно на $15,9 \text{ км}^2$ – с $39,7 \text{ км}^2$ в 1985 г. до $55,6 \text{ км}^2$ в 2024 г. (около 8% от площади водосбора).

²³ <https://satmaps.info/>

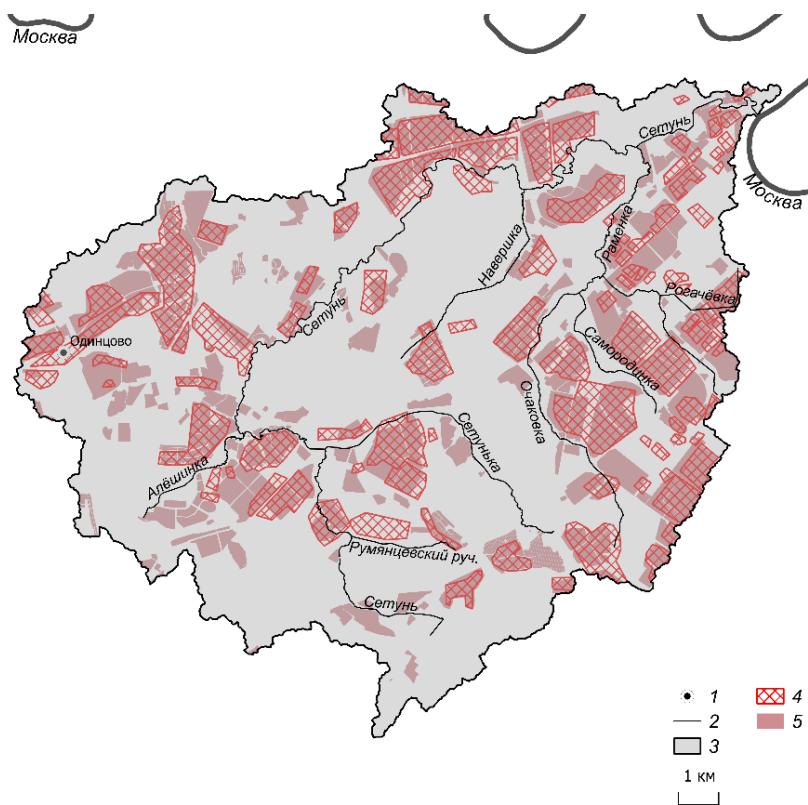


Рисунок 4.2. Динамика жилой застройки в бассейне р. Сетунь (1 – населённые пункты ($>100,000$ человек), 2 – водотоки, 3 – водосбор р. Сетунь, 4 – жилая застройка в 1985 г., 5 – жилая застройка в 2024 г.)

На фоне роста урбанизации наблюдаются значительные изменения сезонного распределения стока р. Сетунь. По сравнению с периодом 1979–1988 гг. отмечается снижение водности весеннего половодья, которое может быть связано с учащением зимних оттепелей и активным вывозом снега на снегоплавильные пункты, что широко практикуется в Москве. Эти процессы согласуются с региональными трендами трансформации стока и частично обусловлены климатическими изменениями [Горбаренко и др., 2021].

В то же время повторяемость экстремальных паводков возросла примерно в 7–10 раз, стандартное отклонение суточных расходов воды по данным за 1979–1988 гг. составляло $1,45 \text{ м}^3/\text{с}$, а за 2019–2024 – $1,77 \text{ м}^3/\text{с}$ (рост на 22%). Этот тренд отражает усиление изменчивости интенсивных осадков, зафиксированное в Московском регионе за период 1966–2021 гг. [Чалов и др., 2023а]. Анализ наблюдений за 1997–2020 гг. также указывает на рост экстремальности и интенсивности осадков на 10–15% [Ярынич и др., 2023]. Дополнительным фактором увеличения частоты паводков является снижение водопроницаемости поверхности вследствие роста застройки.

По мере роста урбанизации меняются отличия стока р. Сетунь от стока рек-аналогов, расположенных в естественных условиях. В рамках исследования также был проведён

сравнительный анализ с рекой-аналогом по морфометрическим показателям, находящейся в условиях минимального антропогенного воздействия. В качестве такого объекта выбрана р. Лусянка (**Таблица 4.2, Рисунок 4.3**), которая обладает схожими с р. Сетунь морфометрическими характеристиками: площадь водосбора составляет 174 км^2 , длина реки – 37 км [Ресурсы поверхностных вод СССР..., 1973]. Для сравнения у р. Сетунь эти показатели равны 190 км^2 и 38 км соответственно. Лусянка представляет собой правый приток Москвы-реки выше Можайска, берущий начало в урочище Григорово Можайского района. Исток реки располагается в понижениях среди холмов, а русло направлено преимущественно на северо-восток. В верхнем течении Лусянка имеет широкую пойму до 400–500 м, ровную и местами заболоченную, покрытую кустарниковой растительностью, при этом русло выражено слабо и неглубоко врезано. По мере продвижения вниз по течению река пересекает холмистую местность, формируя узкую и извилистую долину с крутыми склонами, многочисленными обнажениями и оврагами. Впадает Лусянка в Можайское водохранилище в 0,5 км к северо-западу от деревни Черники, а её устье полностью затоплено водами водохранилища. Наиболее крупным притоком Лусянки является р. Жезлянка [Озерова, 2014]. По данным OSM доля жилой застройки на водосборе Лусянки составляет всего 3,58% от общей площади, тогда как для р. Сетунь она около 30%. Для оценки водного стока р. Лусянки (п. Черники) были использованы данные о расходах воды за период с 1980 по 1988 г. (за исключением 1986 г.), полученные по архивным ежегодникам, а также данные об уровнях с 2008 по 2021 г. на основе сведений АИС ГМВО²⁴. В настоящее время на гидрологическом посту Черники проводятся только наблюдения за уровнями воды, а измерения расходов не выполняются.

Таблица 4.2

Сравнительные характеристики водосборов рек Сетунь и Лусянки

Параметр	Сетунь	Лусянка
Площадь водосбора, км^2	190	174
Длина реки, км	38	37
Густота речной сети, $\text{км}/\text{км}^2$	0,38	0,30
Средний уклон реки, $\text{м}/\text{км}$	1,6	1,9
Средний уклон водосбора, $\text{м}/\text{км}$	5–8	3,6
Коэффициент залесённости, %	23,3	81,6
Коэффициент озёрности, %	0,82	0,01

²⁴ <http://gis.vodinfo.ru/>

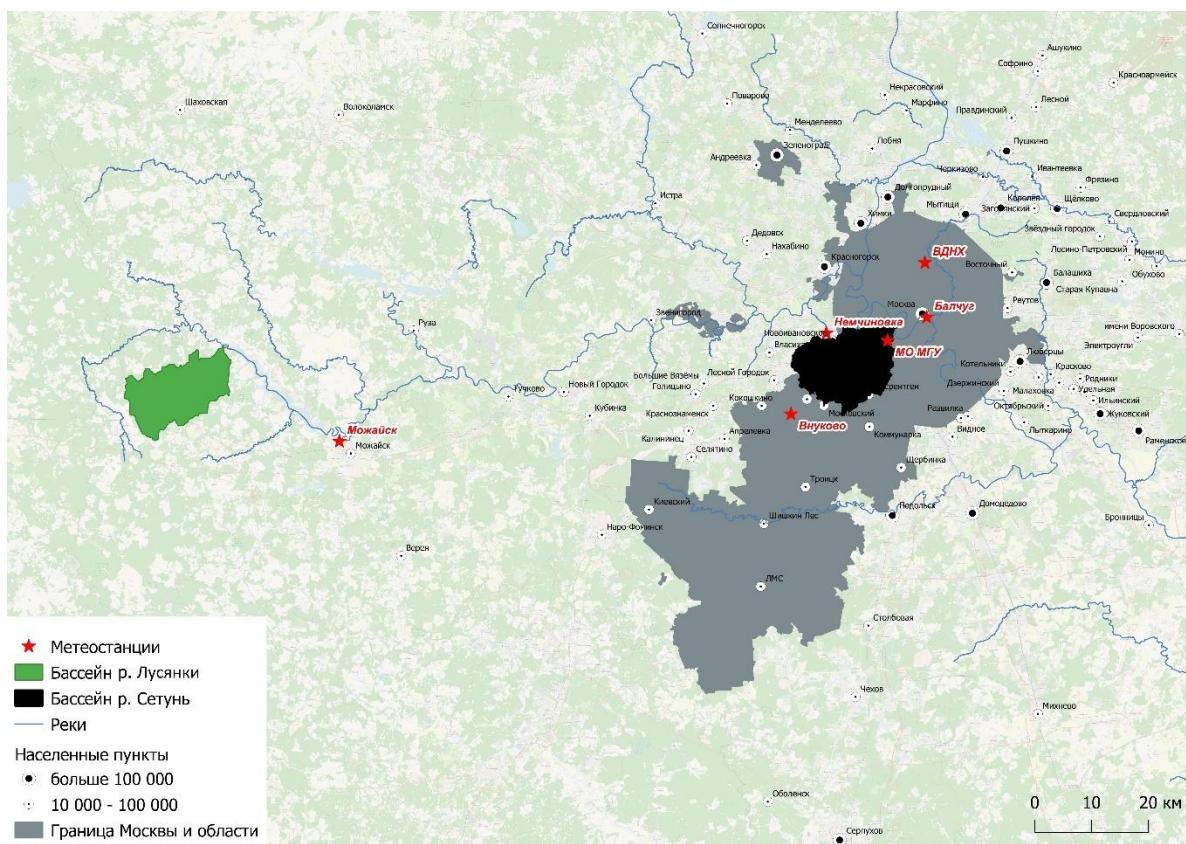


Рисунок 4.3. Расположение бассейнов рек Сетунь и Лусянки

Основные характеристики весеннего половодья на пр. Сетунь (городской водосбор) и Лусянке (естественный водосбор) представлены в **Таблице 4.3**. В среднем для обеих рек половодье начинается примерно 21 марта, однако у Лусянки оно заканчивается значительно позже – около 22 апреля, в то время как у р. Сетунь – около 10 апреля. Это говорит о более длительной продолжительности половодья у естественного водосбора. В 60% случаев весеннее половодье на р. Сетунь начинается примерно на 4 дня раньше, чем на водосборе р. Лусянки, что связано с тем, что на естественных водосборах начало половодья обычно запаздывает по сравнению с началом снеготаяния, так как часть ставшей воды расходуется на поглощение почвой, а также с влиянием городского острова тепла, который обеспечивает более высокие температуры и ускоренное снеготаяние в урбанизированных условиях. В городе, где значительная часть поверхности непроницаема, талые воды беспрепятственно стекают в гидрографическую сеть, вызывая подъём уровня. Поэтому на урбанизированном водосборе половодье наступает сразу вслед за начавшимся снеготаянием, то есть раньше, чем на естественном водосборе (например, в 1980, 1981, 1983, 1985 гг.). Исключением стали 1984, 1987, 1988 гг., когда половодье на р. Лусянке началось позже на 3, 2 и 9 дней соответственно. Это отличие может быть обусловлено синоптическими особенностями конкретного года – различиями погодных условий, которые влияют на сроки снеготаяния и формирование стока.

Таблица 4.3

Основные характеристики весеннего половодья на реках Сетунь и Лусянке

Год	Начало	Конец	Продолжительность, сут	Экстремальный расход, м³/с
Сетунь				
1979	27.03	10.04	19	17,4
1980	29.03	16.04	18	8,83
1981	14.03	12.04	29	14
1982			нет данных	
1983	13.03	02.04	20	21,5
1984	26.03	10.04	15	14,2
1985	18.03	14.04	27	19,8
1986			нет данных	
1987	27.03	11.04	15	8,3
1988	20.03	09.04	20	13,3
Среднее	21.03	10.04	20,4	14,7
Лусянка				
1979			нет данных	
1980	04.04	08.05	34	21,9
1981	15.03	06.04	22	26,5
1982	19.03	15.04	27	33,4
1983	18.03	07.04	20	61
1984	23.03	20.04	28	17,5
1985	22.03	29.04	38	26,5
1986			нет данных	
1987	25.03	13.05	49	14
1988	11.03	18.04	38	20,5
Среднее	21.03	22.04	32	27,7

На р. Сетунь за период 1979–1988 гг. все годовые максимумы формируются исключительно в период весеннего половодья (март–апрель), тогда как для Лусянки только 62,5% годовых максимумов приходится на период весеннего половодья, а остальные 37,5% связаны с летними паводками. Средняя продолжительность половодья на р. Сетунь составила около 20,4 суток, на р. Лусянке – около 32 суток, что почти в 1,6 раз больше. Данное различие отражает быстрое прохождение стока по городской территории и более плавный, протяжённый во времени сток в естественных условиях. Значения максимальных расходов половодья также существенно различаются: у р. Лусянки они составляют в среднем около 27,7 м³/с, что в 1,9 раза превышает аналогичные показатели для р. Сетунь (14,7 м³/с). В **Таблице 4.3** виден большой разброс по годам значений продолжительности и максимального расхода для обеих рек, особенно выраженный для Лусянки, где в некоторые годы половодье длилось около 2 месяцев (например, в 1987 г. – 49 суток).

Урбанизация значительно меняет гидрологический режим малых рек, увеличивая средние расходы за счёт быстрого отвода поверхностных вод, в то время как в природных

водосборах наблюдается более длительный и мощный весенний сток с высокими максимальными расходами. Формы осреднённых за период с 1980 по 1988 г. гидрографов стока рр. Сетунь и Лусянки в период половодья очень близки (**Рисунок 4.4**). Многопиковость гидрографов может быть связана с прерывистым характером снеготаяния в отдельные годы и последовательным сходом снега сначала в поле, а затем в лесу. Совпадение числа пиков в половодье на реках говорит о том, что такая сложная форма гидрографа р. Сетунь обусловлена не только метеорологическими причинами. Довольно большую роль в формировании стока продолжает играть и неурбанизированная (сельская), часть водосбора реки. В начале половодья в реку поступают талые воды с полевых участков водосбора, а затем с участков, занятых лесом, где снеготаяние запаздывает. Следует отметить долю весеннего половодья в годовом стоке. Для р. Сетунь она составляет в среднем около 9%, тогда как для Лусянки – около 31%. Причиной уменьшения относительной величины весеннего стока р. Сетунь является большая величина базисного стока на городской реке.

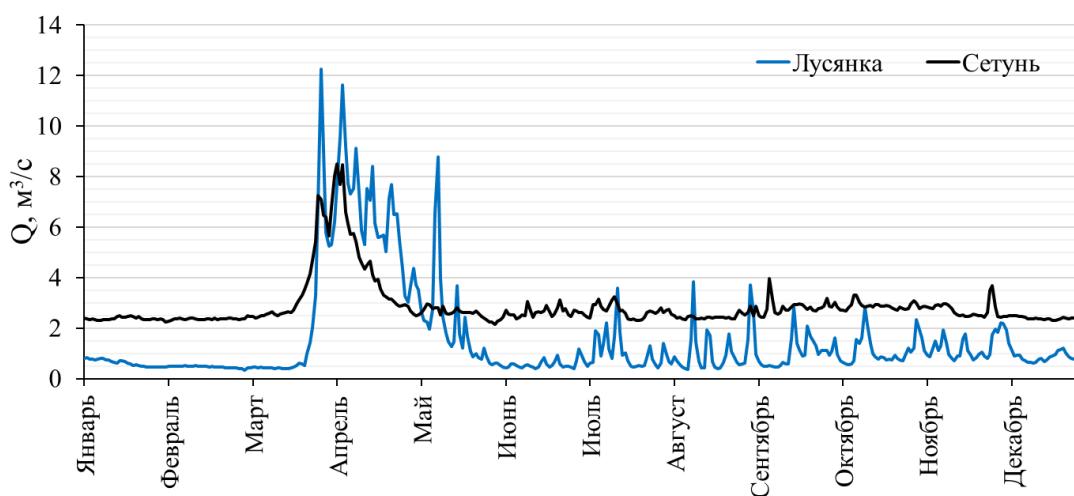


Рисунок 4.4. Осреднённые суточные гидрографы р. Сетунь (г.п. Сложные Эфиры) и р. Лусянки (п. Черники) за 1980–1988 гг.

Значения среднегодового расхода воды за период 1979–1988 гг. для р. Сетунь составили в среднем около $2,9 \text{ м}^3/\text{с}$, что значительно превосходит аналогичный показатель для р. Лусянки ($1,7 \text{ м}^3/\text{с}$). Однако максимальные расходы у Лусянки в среднем гораздо выше и достигают $30,2 \text{ м}^3/\text{с}$, что почти в 2 раза больше, чем у р. Сетунь ($14,7 \text{ м}^3/\text{с}$). Такое соотношение характерно для урбанизированных водосборов: повышенные среднегодовые расходы р. Сетунь обусловлены регулярными сбросами сточных вод и увеличенным поверхностным стоком с городских территорий, в то время как относительно низкие максимальные расходы объясняются регулирующим воздействием прудов и системы городского водоотведения. Естественный водосбор Лусянки, напротив, сохраняет типичную для малых рек контрастность

гидрологического режима с низким базисным и высоким паводочным стоком. Амплитуда колебаний стока, выраженная отношением максимального расхода к среднему, также значительно отличается: для Лусянки она достигает 18,3, тогда как для р. Сетунь она не превышает 5,1.

На р. Сетунь наблюдалось значительно большее количество паводков – в среднем около 37 в год, из которых 23 являются дождевыми. На р. Лусянке паводков существенно меньше – около 15 в год, 12 из которых дождевые (**Таблица 4.4**). Однако несмотря на большую частоту паводков на урбанизированном водосборе, их интенсивность была существенно ниже по сравнению с естественными условиями. Анализ максимальных дождевых паводков за период 1979–1988 гг. показал, что средние максимальные расходы дождевых паводков на р. Лусянке ($15,5 \text{ м}^3/\text{с}$) почти в 2 раза превышают аналогичные показатели р. Сетунь ($7,7 \text{ м}^3/\text{с}$). Абсолютный максимум дождевого паводка на естественном водосборе достигал $33,9 \text{ м}^3/\text{с}$ в мае 1988 г., что в 2,5 раза превосходит максимальный дождевой паводок на урбанизированной территории – $13,8 \text{ м}^3/\text{с}$ в сентябре 1983 г.

Таблица 4.4

Среднегодовые и максимальные расходы воды рек Сетунь и Лусянки за 1980–1988 гг.

Год	Сетунь					Лусянка				
	$Q_{ср}, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_{max}, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_{max}/Q_{ср}$	Количество паводков		$Q_{ср}, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_{max}, \text{м}^3/\text{с}$	$Q_{max}/Q_{ср}$	Количество паводков	
				оттепел.	дожд.				оттепел.	дожд.
1979	2,5	17,4	7	22	17	нет данных				
1980	2,7	8,8	3,3	16	24	2,2	28,4	12,9	4	9
1981	2,8	14	5	3	17	1,8	26,5	14,7	3	10
1982	нет данных					1,8	33,4	18,6	11	15
1983	3,1	21,5	6,9	21	32	1,6	61	38,1	3	15
1984	2,7	14,2	5,3	17	23	1	17,5	17,5	1	14
1985	3,2	19,8	6,2	8	24	1,8	26,5	14,7	2	12
1986	нет данных					нет данных				
1987	2,9	8,3	2,9	17	19	1,3	14	10,8	1	10
1988	3,1	13,3	4,3	9	24	1,8	33,9	18,8	1	13
Ср.	2,9	14,7	5,1	14	23	1,7	30,2	18,3	3	12

При сравнении реакции урбанизированного водосбора и аналога в естественных условиях (р. Лусянки) в современный период видно, что в настоящее время влияние застройки стало еще отчетливее (**Рисунок 4.5**). В целом отмечается рост повторяемости паводков на урбанизированной территории бассейна р. Сетунь по сравнению с менее застроенным водосбором р. Лусянки. Основная причина подобных различий связана с особенностями поверхностного покрова на рассматриваемых водосборах. В пределах городской части бассейна

р. Сетунь значительная доля осадков практически без потерь попадает в русловую сеть благодаря преобладанию искусственных водонепроницаемых покрытий. В естественных условиях, характерных для бассейна р. Лусянки, большая часть осадков расходуется на смачивание почвы и инфильтрацию, что снижает объём и частоту формирования паводков.

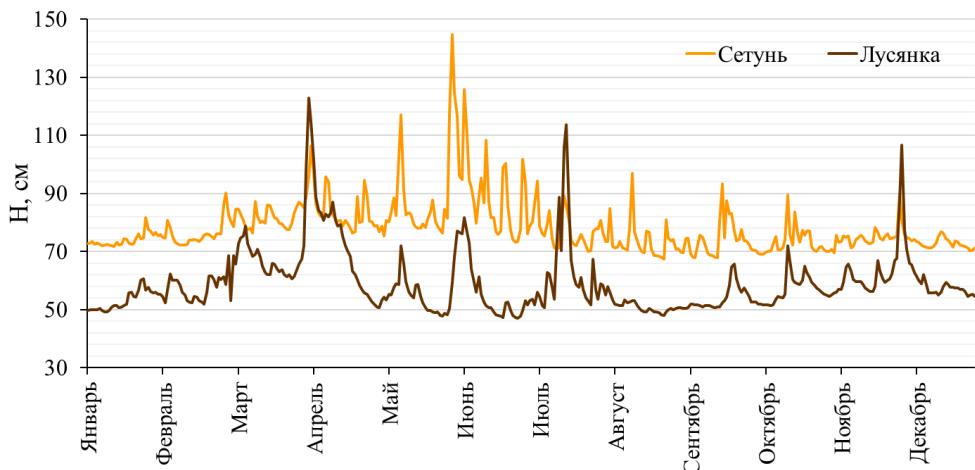


Рисунок 4.5. Осреднённые суточные относительные уровни р. Сетунь (пост С5 сети наблюдений МГУ) и р. Лусянки (п. Черники) за 2019–2021 гг.

В отличие от ситуации, наблюдавшейся в 1980-х гг., когда процессы быстрого добегания осадков до русла на водосборах рр. Сетунь и Лусянка проявлялись слабо, современные исследования выявили выраженное ускорение формирования паводков на урбанизированной территории. Согласно данным последних лет [Чалов и др., 2023а], время добегания воды при экстремальных ливнях в бассейне р. Сетунь составляет всего 6–8 часов, тогда как на Лусянке аналогичные осадки вызывают подъём уровня воды только спустя примерно 15 часов. Время добегания воды представляет собой интервал времени от начала выпадения осадков до достижения пика расхода в замыкающем створе водосбора. Для р. Лусянки этот параметр определён на основе анализа временных лагов между зарегистрированными осадками на метеостанции в г. Можайске и пиковыми расходами в створе наблюдений, с учётом особенностей формирования стока на естественном водосборе. Основная причина подобных различий заключается в особенностях водосбора р. Лусянки, где для формирования паводка требуется постепенное накопление влаги до критических значений. Так, даже интенсивные осадки свыше 80 мм/сутки не приводили к значительному подъёму уровня воды; существенный паводок возникал лишь после серии последовательных ливней. Для р. Сетунь, напротив, резкий подъём уровня наблюдался спустя 2–6 часов после выпадения экстремальных осадков. Кроме того, при превышении определённого порога осадков на урбанизированном водосборе формируется двухмодальный гидрограф: первая волна поступает в русло преимущественно с искусственных непроницаемых поверхностей и через ливневую канализацию, а вторая – с

более проницаемых территорий (леса, парки, газоны). Тем самым процессы гидрологической трансформации, ранее не характерные для бассейна в многолетней истории, становятся определяющими для современной городской реки.

4.2. Особенности современного сезонного стока. Источники питания р. Сетунь

Анализ гидрологических данных (**Таблица 4.5**) р. Сетунь в 2020–2024 гг., полученных на станциях С3 и С5, позволил дать оценку сезонного стока и его особенностей при прохождении дождевых и оттепельных паводков. В течение наблюдавшегося периода они отличались своей кратковременностью, что свидетельствует о быстрой реакции водосбора на выпадение атмосферных осадков и температурные изменения. В нижнем створе С5 пиковые расходы воды в течение года варьировали от 16,1 (2022 г.) до 30,8 м³/с (2021 г.), причём максимальные значения всегда формировались паводками, вызванными выпадением экстремальных дождевых осадков. Среднегодовые расходы воды на С5 в целом выше, чем на С3 – от 2,2 до 2,7 м³/с против 1,1–1,2 м³/с.

Таблица 4.5

Характеристики водного режима р. Сетунь, основанные на высокочастотных данных

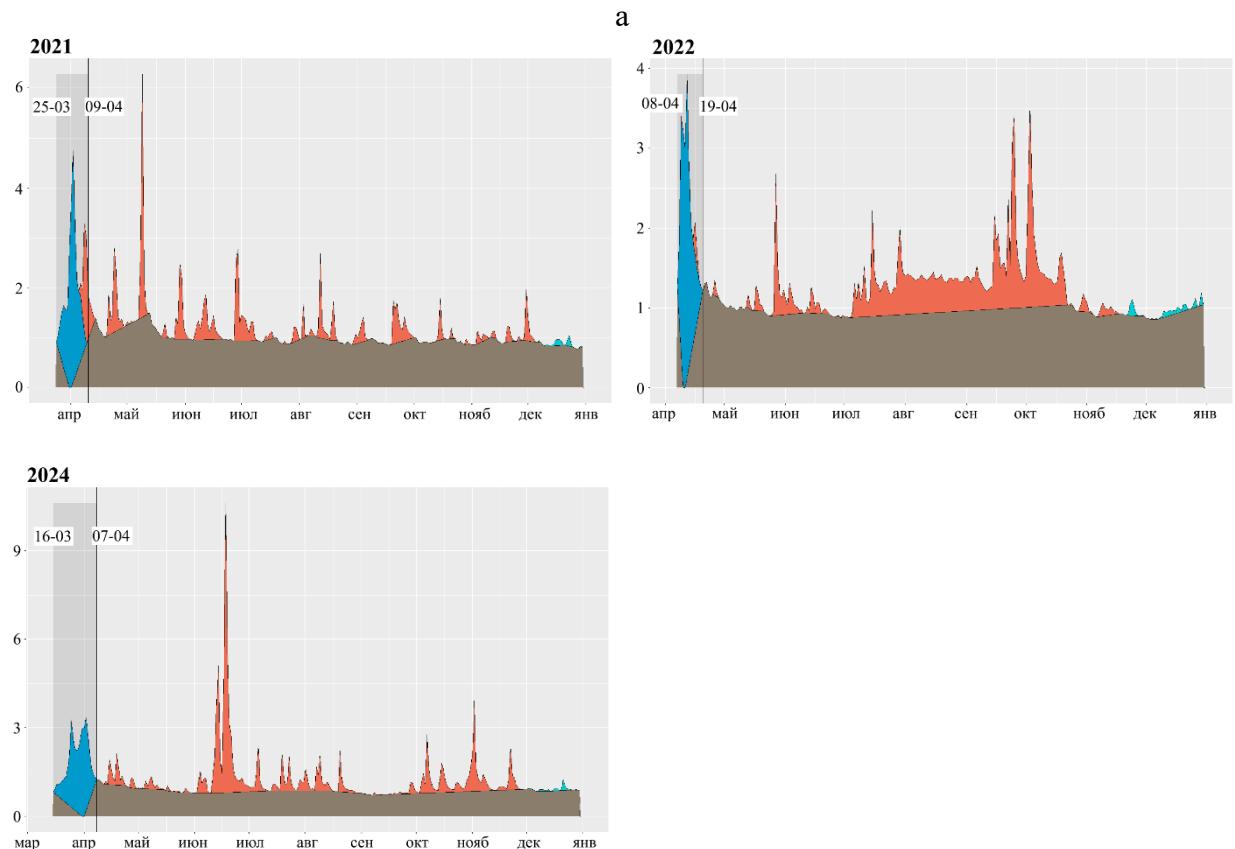
Год	Станция	Q_0 , м ³ /с	Q_{max} , м ³ /с	Q_{min} , м ³ /с	Q_{max}/Q_{min}	Q_{max}/Q_0
2020	C3	1,11	10,98	0,65	16,77	9,87
	C5	2,55	29,10	0,93	31,24	11,42
2021	C3	1,14	8,10	0,65	12,55	7,11
	C5	2,27	30,76	0,93	33,16	13,57
2022	C3	1,20	4,78	0,75	6,42	3,98
	C5	2,18	16,10	0,84	19,06	7,37
2023	C3	1,10	9,22	0,56	16,34	8,42
	C5	2,68	26,77	0,71	37,82	9,99
2024	C3	1,18	12,30	0,56	22,04	10,42
	C5	2,43	26,68	0,98	27,28	10,99

Примечание: Q_0 – средний фактический (расчётный) расход воды, Q_{max} – максимальный фактический (расчётный) расход воды, Q_{min} – минимальный фактический (расчётный) расход воды.

Коэффициент внутригодовой неравномерности стока, выраженный отношением максимального фактического расхода к минимальному, достигал наибольших значений в створе С5, что связано с большей вариабельностью гидрологического режима в нижнем течении реки, обусловленной накопительным эффектом урбанизации. По мере увеличения площади водосбора от С3 к С5 возрастает доля водонепроницаемых покрытий, что приводит к усилению контрастности между минимальными и максимальными расходами. Например, в

2023 г. этот коэффициент на С5 составил около 37,8, что значительно превышает аналогичный показатель на С3 (около 16,3). Напротив, на верхнем створе С3, где площадь водосбора меньше, амплитуда колебаний стока была существенно меньше, максимальные значения расходов, составляющие от 4,78 до 12,3 м³/с, носили менее экстремальный характер. Показатель отношения максимального расхода к среднему также варьирует в пределах от 3,98 (С3, 2022 г.) до 13,6 (С5, 2021 г.), демонстрируя значительную амплитуду гидрологических колебаний, особенно на нижнем створе [Денисова и др., 2025].

В течение 2020–2024 гг. на постах наблюдений С3 и С5 ежегодно фиксировалось от 15 до 34 паводков, при этом доля оттепельных паводков менялась от 1 до 9, а дождевых – от 14 до 28 (**Таблица 4.6**). Дождевые паводки встречались почти в 6–7 раз чаще, чем оттепельные. Количество оттепельных паводков снижалось по мере продвижения вниз по течению р. Сетунь, в то время как число дождевых изменялось неоднозначно. Подобные колебания обусловлены пространственной неоднородностью выпадения осадков в пределах бассейна [Чалов и др., 2023а]. В нижнем течении р. Сетунь доля водонепроницаемых покрытий достигает 40%, что способствует ускорению поверхностного стока и значительно повышает максимальные расходы во время дождевых паводков. В результате максимальные расходы воды в замыкающем створе С5 могут превышать аналогичные показатели вышерасположенных постов почти в 3 раза [Денисова и др., 2025].



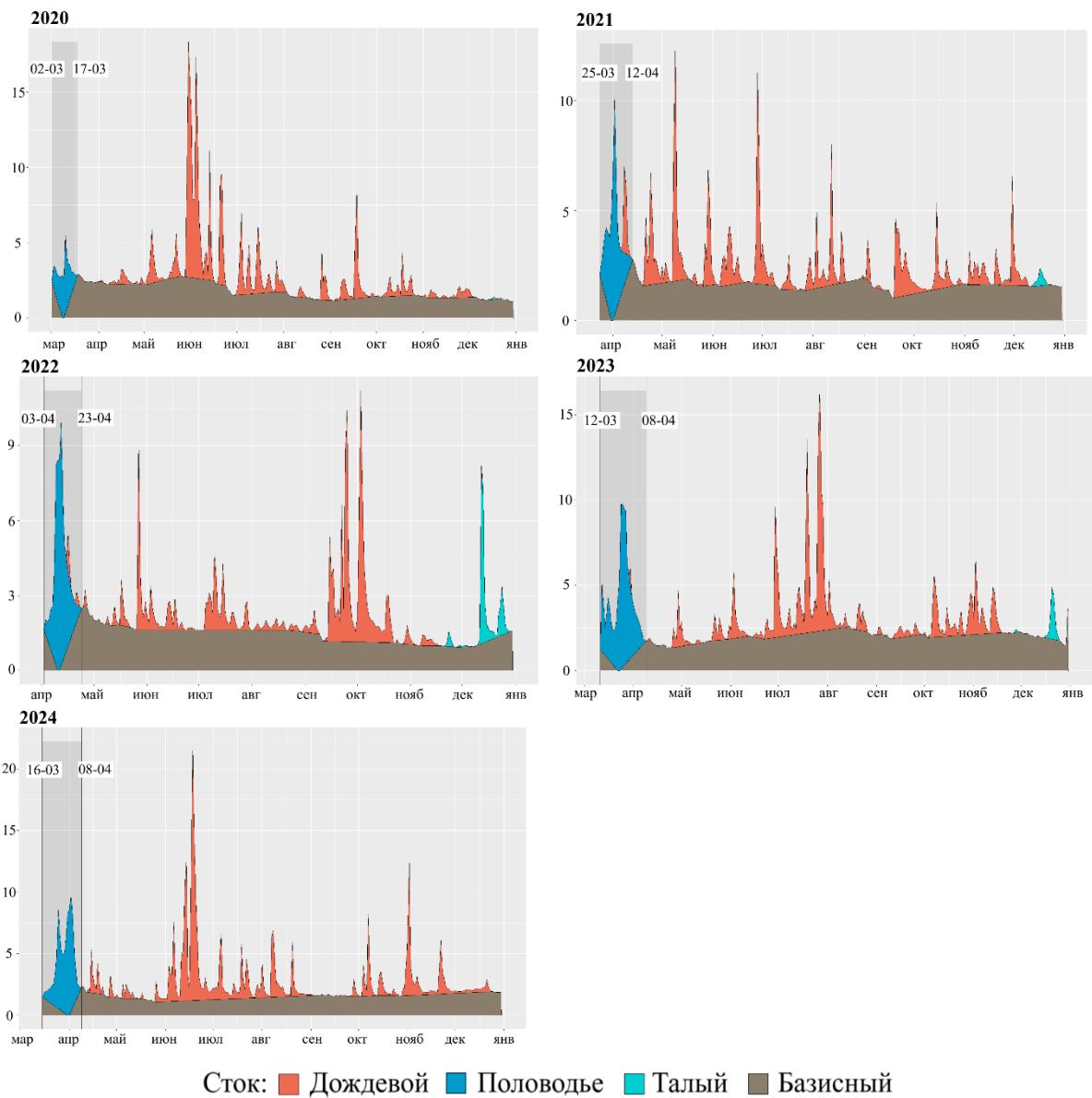


Рисунок 4.6. Гидрограф р. Сетунь, выделенный с помощью алгоритма GrWat для гидрологических станций С3 (а), С5 (б) (первая дата – дата начала весеннего половодья, вторая дата – дата окончания весеннего половодья, ось у – суммарный расход, $\text{м}^3/\text{s}$)

Анализ гидрографов (**Рисунок 4.6**) показал, что в настоящее время основную часть годового стока р. Сетунь формирует базисный сток, составляющий в среднем 65% годового объёма. При этом важно отметить, что под базисным стоком понимаются не только грунтовые воды, но и техногенно трансформированный сток различного генезиса. Это объясняется значительной зарегулированностью стока и большим вкладом поступления вод из городских систем водоотведения, сточных и ливневых вод, утечек из водопроводных сетей и иных технических перераспределений воды (полив дорог, топление снега, мойка машин и др.) [Денисова и др., 2025]. Значительную роль в увеличении базисного стока играют сточные воды. Согласно официальной статистике, их объём оценивается в 25,9% от среднегодового стока р. Сетунь (см. **Раздел 2.1**).

Таблица 4.6

Характеристики гидрологического режима р. Сетунь в 2020–2024 гг. (на основе модели GrWat)

Характеристика	2020		2021		2022		2023	2024	
	C5	C3	C5	C3	C5	C5	C3	C5	
Дата начала половодья	02.03	25.03	25.03	08.04	03.04	12.03	16.03	16.03	
Дата конца половодья	17.03	09.04	13.04	19.04	23.04	08.04	07.04	08.04	
Средний расход за водохозяйственный год, м ³ /с	2,62	1,21	2,46	1,27	2,29	2,98	1,26	2,74	
Максимальный расход за водохозяйственный год, м ³ /с	18,36	6,28	12,60	3,93	11,20	16,40	10,61	22,25	
Средний расход базисного стока за водохозяйственный год, м ³ /с	1,73	0,94	1,56	0,94	1,40	1,89	0,83	1,48	
Объём годового стока, млн м ³	6,94	3,05	6,00	3,01	5,47	7,61	3,18	6,93	
Объём базисного стока, млн м ³ и % от годового	4,56	2,36	3,80	2,23	3,33	4,81	2,08	3,71	
	66%	77%	63%	74%	61%	63%	65%	54%	
Объём половодья, млн м ³ и % от годового	0,29	0,22	0,49	0,19	0,60	0,90	0,31	0,80	
	4%	7%	8%	6%	11%	12%	10%	12%	
Объём дождевого стока, млн м ³ и % от годового	2,08	0,45	1,69	0,58	1,30	1,79	0,77	2,40	
	30%	15%	28%	19%	24%	24%	24%	35%	
Объём оттепельного стока, млн м ³ и % от годового	0,004	0,02	0,03	0,01	0,22	0,09	0,01	0,0003	
	0,06%	0,66%	0,50%	0,33%	4,02%	1,18%	0,31%	0,00%	
Максимальный расход дождевых паводков, м ³ /с	15,64	4,87	10,80	2,54	10,05	14,07	9,80	21,04	
Максимальный расход оттепельных паводков, м ³ /с	0,13	0,33	0,81	0,21	7,13	3,04	0,38	0,04	
Количество оттепельных паводков	2	6	2	9	4	5	6	1	
Количество дождевых паводков	24	28	21	15	17	16	19	14	

Важной особенностью гидрологического режима р. Сетунь выступает преобладание летних дождевых паводков над весенним половодьем. Доля весеннего половодья в годовом стоке изменялась по годам от 4% до 12%, тогда как доля дождевого стока составляла от 15% до 35% (**Таблица 4.6**). По данным наблюдений расходы воды в период прохождения половодья ниже, чем во время дождевых паводков. Например, в 2020 г. весенне половодье практически отсутствовало (4% от годового стока), в то время как 29–31 мая выпали экстремальные осадки, увеличившие долю дождевых паводков на нижнем посту С5 до 30%. Такая тенденция снижения роли весеннего половодья и усиления дождевых паводков характерна не только для р. Сетунь, но и для рек Верхней Волги и Московского региона в целом, что объясняется климатическими изменениями [Болгов и др., 2020]. Кроме того, в Москве количество паводков (дождевых и оттепельных) значительно выше средних региональных значений: для рек Верхней Волги характерно 7–10 паводков в год, из которых 6–8 дождевых [Горбаченко и др., 2021], тогда как на р. Сетунь их число значительно выше [Денисова и др., 2025].

Следует отметить, что нечётко выраженная сезонная структура гидрографа и затруднения при выделении ФВР в городской реке ограничивают применение модели GrWat для урбанизированных водосборов и требуют дополнительной доработки методик расчленения гидрографа. Более того, в условиях урбанизированных территорий принцип, предложенный Б.И. Куделиным, не всегда применим, поскольку динамика подземного питания рек существенно изменена техногенными факторами, а гидрогеологическая съёмка для изучаемых участков отсутствует. Поэтому использование этого метода в данной работе следует рассматривать как допущение, применённое для единообразного расчленения гидрографов и сравнительной оценки ФВР. Проверка альтернативных вариантов расчленения показала, что даже при предположении сохранения подземного питания во время половодья (что может быть более реалистичным для городских рек, в частности для р. Сетунь), общие тенденции сохраняются: преобладание базисного стока, многочисленные летние паводки и относительно малое весенне половодье. Это подтверждает, что выбранное допущение не искажает общую интерпретацию структуры современного водного режима р. Сетунь.

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

Проведённый в предыдущей главе сравнительный анализ многолетних изменений водного стока р. Сетунь на фоне процессов урбанизации показал высокую изменчивость гидрологического режима городских рек по сравнению с реками в естественных условиях. Полученные данные о динамике расходов, значительном увеличении числа паводковых событий и трансформации гидрографа закладывают основу для дальнейшего исследования ещё одного важного элемента режима урбанизированных рек – особенностей формирования и переноса ВВ. В настоящей главе анализируются пространственно-временные закономерности мутности воды и стока наносов в бассейне р. Сетунь.

5.1. Пространственно-временные закономерности формирования мутности воды р. Сетунь

Для оценки содержания ВВ в воде р. Сетунь была установлена зависимость между оптической мутностью воды, измеренной портативными зондами (в NTU), и весовой мутностью, определённой в лаборатории весовым методом (в мг/л). Калибровочная зависимость была получена на основе одновременных измерений обеих характеристик для проб, отобранных в различные ФВР – в периоды межени (145 проб), весеннего половодья (24 пробы) и дождевых паводков (13 проб). Всего использовано 182 парных измерений за 2019–2023 гг. (**Рисунок 5.1**).

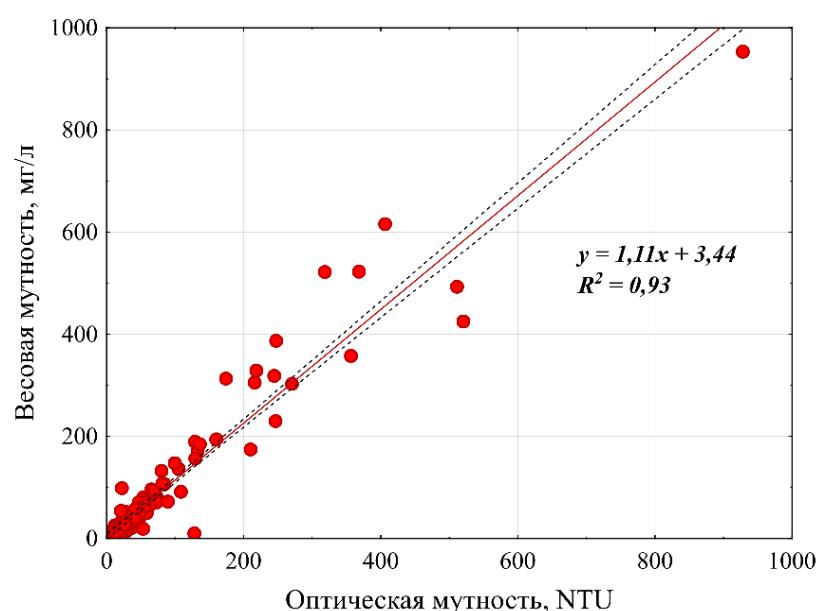


Рисунок 5.1. Связь оптической и весовой мутности (сплошная линия – линия регрессии,
пунктирные линии – 95% доверительный интервал)

Полученная зависимость характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,93$, что указывает на высокую степень согласованности между результатами оптических и весовых измерений. Средняя относительная погрешность при использовании уравнения пересчёта составила около 40,3%, что обусловлено изменением физических характеристик взвешенных частиц в зависимости от ФВР. В периоды половодья и паводков наблюдаются более крупные и неоднородные по составу взвеси, изменяющие соотношение между массовой концентрацией и интенсивностью светового рассеяния. Взвешенные частицы одинаковой массы, но различающиеся по размеру, взаимодействуют со световым потоком по-разному: мелкодисперсные фракции вызывают более сильное рассеяние света по сравнению с крупными частицами того же веса, что объясняется различиями в процессах рассеяния и преломления света [Белозёрова, Чалов, 2013]. Наименьший разброс значений и наиболее тесная корреляция между двумя методами наблюдались в условиях межени. Диапазон весовой мутности воды р. Сетунь в мониторинговых створах за весь период наблюдений составил от 5,2 до 953,5 мг/л.

Для анализа продольной трансформации стока ВВ были использованы данные, собранные на 7 станциях мониторинга (**Рисунок 5.2**). В верховьях р. Сетунь, на станциях С1 и С6, средние значения мутности за исследуемый период составили 51,5 и 40,2 мг/л соответственно (**Таблица 5.1**). На этом участке речной сети наблюдается наименьшая доля урбанизированных территорий. Еще одной особенностью является расположение станции С6 сразу ниже очистных сооружений Мосводостока. Несмотря на увеличение антропогенной нагрузки вниз по течению, анализ выявил меньшие средние и медианные значения мутности на С6 (40,2 мг/л и 14,3 мг/л соответственно) – даже ниже, чем на С1 (51,5 и 19 мг/л), что может свидетельствовать об эффективности очистных сооружений в снижении уровня ВВ. Однако высокие максимальные значения (до 303 мг/л) и широкий разброс данных указывают на поступление загрязнённых стоков. Средние створы (С2, С7) характеризуются средними значениями 28,7 и 30,6 мг/л и медианой около 16–18 мг/л, что немного ниже, чем на верхних створах. Для нижних створов (С8, С9, особенно С10) выявлено явное повышение значений мутности: средние значения достигают 65 мг/л на С8, 66,8 мг/л на С9 и существенно возрастают до 109,3 мг/л на С10. Медианы растут от 25,1 мг/л (С8) до 46,7 мг/л (С10).

Явное повышение мутности в нижних створах р. Сетунь (С8, С9 и особенно С10), включая резкий рост показателей почти в 2–3 раза при переходе от С7 к С8, можно связать с влиянием различных факторов. Станция С8 расположена в непосредственной близости (ниже по течению на 1 км) от Сетуньских групповых очистных сооружений (СГОС). Поскольку подробные данные о работе подобных предприятий находятся в закрытом доступе, можно лишь предположить причины резкого увеличения мутности после СГОС: (1) возможное попадание остаточной взвеси и технических добавок; (2) сезонные нагрузки и аварийные ситуации; (3)

возможное взмучивание донных отложений вследствие изменённых гидродинамических условий; (4) технологические особенности и вариабельность работы СГОС. Кроме того, в 2019–2023 гг. на участке между С8 и С10 проводились строительные работы, включая железнодорожную эстакаду с Большой кольцевой линии (БКЛ) в электродепо «Аминьевское», жилые комплексы (ЖК) на ул. Нежинской, ЖК West Garden (просп. Генерала Дорохова), транспортную развязку просп. Генерала Дорохова и Минской ул., ЖК Hide (1-й Сетуньский пр.)²⁵, что также могло стать причиной повышения мутности вниз по течению.

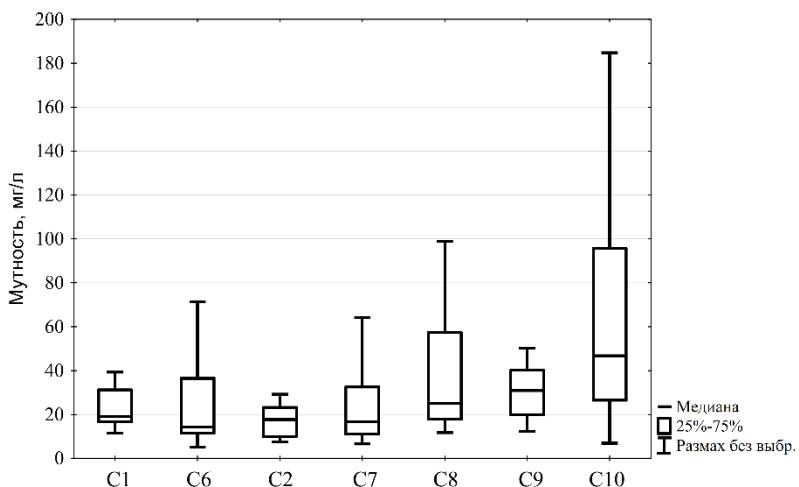


Рисунок 5.2. Продольное изменение мутности вод р. Сетунь в 2019–2023 гг.

Таблица 5.1

Осреднённые характеристики мутности вод р. Сетунь в 2019–2023 гг.

Пост	Количество измерений	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	25-й процентиль	75-й процентиль
C1	19	51,5	19	11,5	493,2	16,7	31,2
C6	19	40,2	14,3	5,2	303	11,4	36,4
C2	19	28,7	17,7	7,4	189,8	10	23,2
C7	19	30,6	16,7	6,6	132,6	11,1	32,5
C8	19	65	25,1	11,7	425,5	17,8	57,3
C9	19	66,8	30,9	12,3	616	19,9	40,1
C10	81	109,3	46,7	6,9	953,5	26,5	95,6
Всё	195	73	27,5	5,2	953,5	17,3	60,8

Мутность воды р. Сетунь (С10) большую часть года варьировалась в диапазоне от 26,5 до 107 мг/л, при этом сильно изменяясь в зависимости от ФВР (Таблица 5.2, Рисунок 5.3). Межень характеризуется относительно низкими значениями мутности в диапазоне 6,9–92,1 мг/л при средних значениях 26,2–40,8 мг/л по годам. Расходы воды в этот период составляют преимущественно 1,2–3,3 м³/с. Повышенные значения мутности в отдельные даты межени (до

²⁵ <https://wikimapia.org/#lang=ru&lat=55.728270&lon=37.515564&z=13&m=w&tag=69361>

92 мг/л) могут объясняться эпизодическими залповыми сбросами из дренажно-коллекторной сети, обладающие незначительным объёмом, но повышенной концентрацией взвешенных веществ [Соколов и др., 2021]. Половодье отличается значительным ростом концентрации ВВ до 35,5–953,5 мг/л при средних значениях 147–292 мг/л. Максимальные расходы воды увеличиваются до 3,2–12,7 м³/с, что способствует активизации русловых процессов и интенсивному смыву наносов с поверхности бассейна. Максимальное значение мутности 953,5 мг/л зафиксировано 11 апреля 2022 г. при среднесуточном расходе 8,76 м³/с, что указывает на экстремальный характер половодья в этом году. Паводки демонстрируют наибольшую вариативность мутности от 21,1 до 611 мг/л со средними значениями 106–398 мг/л по годам. Расходы воды достигают максимальных величин 3,4–30,3 м³/с. Наиболее интенсивный паводок отмечен 28 июня 2021 г. с мутностью 522,9 мг/л при среднесуточном расходе 12,49 м³/с.

Таблица 5.2

Мутность воды (мг/л) р. Сетунь (С10) в различные ФВР в 2019–2023 гг.

ФВР	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	25-й процентиль	75-й процентиль
Межень	35,9	30,3	6,9	92,1	20,4	47,4
Паводки	211,6	131,4	21,1	611	76,6	305,7
Половодье	214,1	142,2	35,5	953,5	61,7	319
Всё	114,8	49,9	6,9	953,5	26,5	107

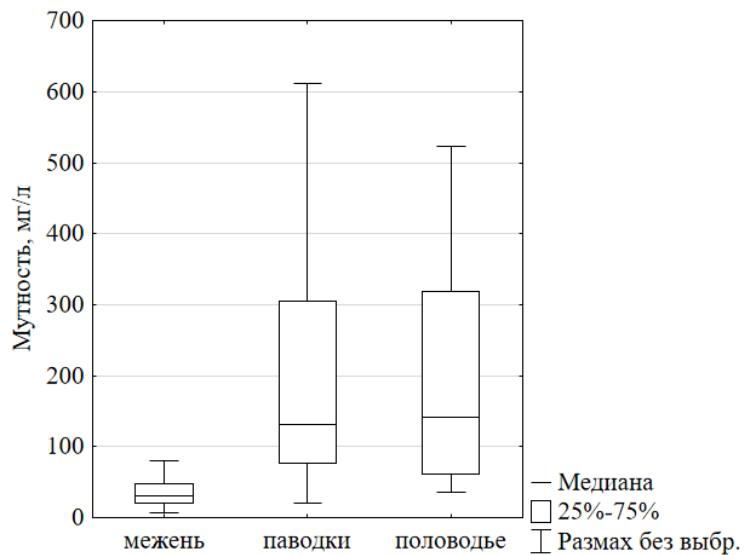


Рисунок 5.3. Мутность воды р. Сетунь (С10) в различные ФВР в 2019–2023 гг.

Анализ парной корреляции между характеристиками мутности воды и морфометрическими параметрами водосбора р. Сетунь показал разную степень зависимости для отдельных показателей мутности (Таблица 5.3). Статистически значимые корреляции между медианой мутности и площадью водосбора ($R = 0,78$, $p\text{-value} < 0,05$), а также длиной русла от истока ($R = 0,77$, $p\text{-value} < 0,05$) отражают закономерный рост медианной мутности

вниз по течению в результате накопления ВВ и увеличения площади нарушенности водосбора в направлении к устью. При этом средняя мутность показала слабую и статистически незначимую связь с морфометрическими характеристиками водосбора. Это связано с тем, что на урбанизированной территории формирование мутности определяется в основном режимом и интенсивностью осадков, антропогенной деятельностью, сезонной изменчивостью и неравномерным распределением источников взвесей. В результате наблюдается высокая изменчивость показателей мутности и частое появление экстремальных значений. Таким образом, средние значения мутности р. Сетунь относительно слабо описываются характеристиками водосборов за счёт неустановившегося режима мутности.

Таблица 5.3

Матрица парной корреляции мутности воды и факторов её формирования по 7 станциям
(отмеченные корреляции значимы на уровне $p\text{-value} < 0,05$)

	Средняя мутность, мг/л	Медиана мутности, мг/л	Средняя мутность половодья, мг/л	Средняя мутность паводков, мг/л
Площадь водосбора, км ²	0,65	0,78	0,61	-0,03
Длина русла от истока, км	0,63	0,77	0,59	-0,11
Залесённость водосбора	0,22	0,19	0,09	-0,21

Примечательно наличие умеренной корреляции значений мутности в период половодья и отсутствие связей для периода паводков (см. Таблицу 5.3). Это объясняется случайным распределением максимальной интенсивности осадков в пределах водосбора, определяющих нелинейный отклик стока наносов на выпадение осадков в разных частях водосбора. На основе сравнения данных измерений мутности на устьевом посту С10 с оценками интенсивности осадков была выявлена эмпирическая связь – наиболее значимая корреляция характерна для связи между средней мутностью за паводок и максимальной интенсивностью осадков за 30 минут (по МО МГУ) (Таблица 5.4), значение коэффициента детерминации R^2 которой составило 0,45 (Рисунок 5.4). Повышенная интенсивность осадков способствует более активному высвобождению из почвы частиц твёрдого стока и определяет объём воды для транспорта этих частиц по поверхности земли, что обуславливает интенсивный смыв почвы [Ларионов, 1993] – с увеличением максимальной интенсивности осадков отмечается рост мутности р. Сетунь.

Следует учитывать, что в условиях урбанизации влияние осадков связано не столько с поверхностным смывом, существенно ограниченным в условиях городского бассейна, сколько с интенсификацией выноса взвесей из ливневой сети и активизацией экзогенных процессов (в том числе русловых размывов) в период выпадения осадков (Рисунок 5.5).

Таблица 5.4

Матрица парной корреляции между мутностью и характеристиками осадков
(отмеченные корреляции значимы на уровне $p\text{-value} < 0,05$)

	Средняя мутность за паводок, мг/л
Слой осадков, мм	0,52
Продолжительность, мин	-0,11
Интенсивность за дождь, мм/мин	0,58
Максимальная интенсивность за 30 мин, мм/30 мин	0,67
Время между дождями, ч	-0,17

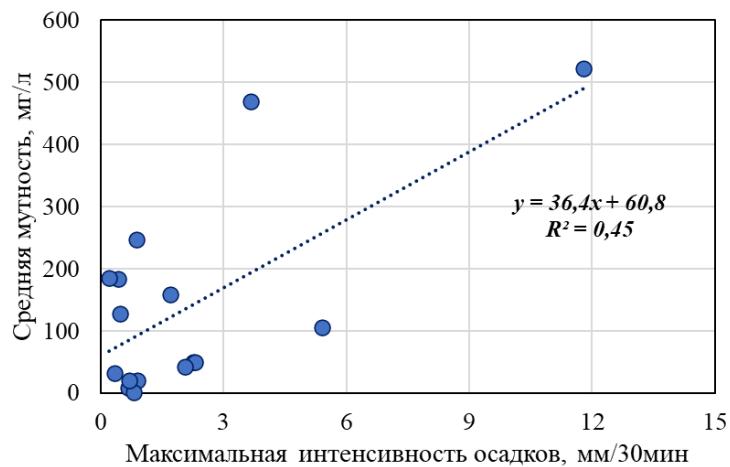


Рисунок 5.4. Связь между измеренной мутностью и максимальной интенсивностью осадков за 30 минут (по МО МГУ) во время прохождения паводков на р. Сетунь (С10)

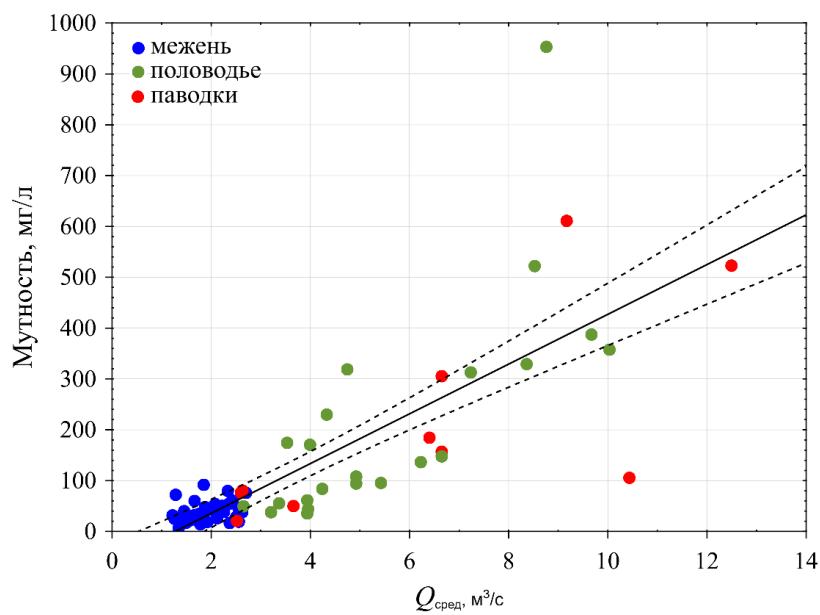


Рисунок 5.5. Зависимость мутности (мг/л) воды, оценённой в результате обработки проб, от среднесуточных расходов воды р. Сетунь во время различных ФВР для станции С10 (сплошная линия – линия регрессии, пунктирные линии – 95% доверительный интервал)

В межень корреляция между мутностью и среднесуточным расходом воды крайне слабая ($R = 0,33$, $p\text{-value} = 0,038$). При расходах всего $1,2\text{--}2,7 \text{ м}^3/\text{с}$ наблюдается изменение мутности от 6,9 до $92,1 \text{ мг/л}$ – разброс более чем в 13 раз при практически неизменных гидрологических условиях, что указывает на независимость источников поступления ВВ от синоптических условий и естественного гидрологического цикла. В половодье и паводки, несмотря на более сильные корреляции ($R = 0,73\text{--}0,78$), наблюдаются систематические отклонения от ожидаемых соотношений – пики мутности часто не соответствуют максимумам расходов. Выявлены случаи резких повышений мутности более чем в 3 раза за короткие интервалы времени. Например, с 30 по 31 марта 2021 г. мутность выросла с 35,5 до 319 мг/л (в 9 раз), тогда как среднесуточный расход увеличился незначительно – с 3,93 до $4,74 \text{ м}^3/\text{с}$ (в 1,2 раза). Такие импульсные изменения невозможны при естественном эрозионном смыве, который характеризуется постепенным нарастанием концентрации ВВ. В исследовании [Чалов и др., 2024] также отмечается отсутствие зависимости резкого повышения мутности от синоптических и гидрологических факторов, что указывает на антропогенное происхождение данных явлений. Это подтверждается многократными наблюдениями, которые указывают на непродолжительные сбросы сильно загрязнённых, в том числе насыщенных взвесями, вод из различных точечных источников в р. Сетунь. Таким образом, рост мутности при увеличении максимальной интенсивности осадков во время паводков на р. Сетунь объясняется в первую очередь не классическим эрозионным смывом почвы, а комплексом урбанистических факторов: усилением нагрузок на ливневую сеть, воздействием сточных вод и локальных антропогенных источников загрязнения.

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 смыает накопленные наносы с городского ландшафта и дорожных покрытий. В сравнении паводки летнего периода часто вызваны локальными ливнями, смыв накопленных ВВ может быть менее интенсивным – как видно на **Рисунке 5.6**, для паводков доверительный интервал более широк по всему диапазону, что подчёркивает большую неопределённость связи между мутностью и максимальными расходами воды во время их прохождения. При этом короткая продолжительность ливневых паводков могла привести к тому, что пиковые значения не были охвачены данными мониторинга.

Анализ поведения мутности воды р. Сетунь (С10) в половодье 2021 и 2022 гг. выявил неравномерное поступление взвесей на подъёме и спаде половодья (**Рисунок 5.7**), которое проявляется в форме петли на графике зависимости мутности от среднесуточного расхода воды. Общей закономерностью выявленного режима является быстрый рост значений мутности на подъёме половодья, объясняемый быстрой доставкой наносов с урбанизированного

водосбора. Быстрое вымывание доступных фракций объясняет снижение мутности воды на спаде половодья.

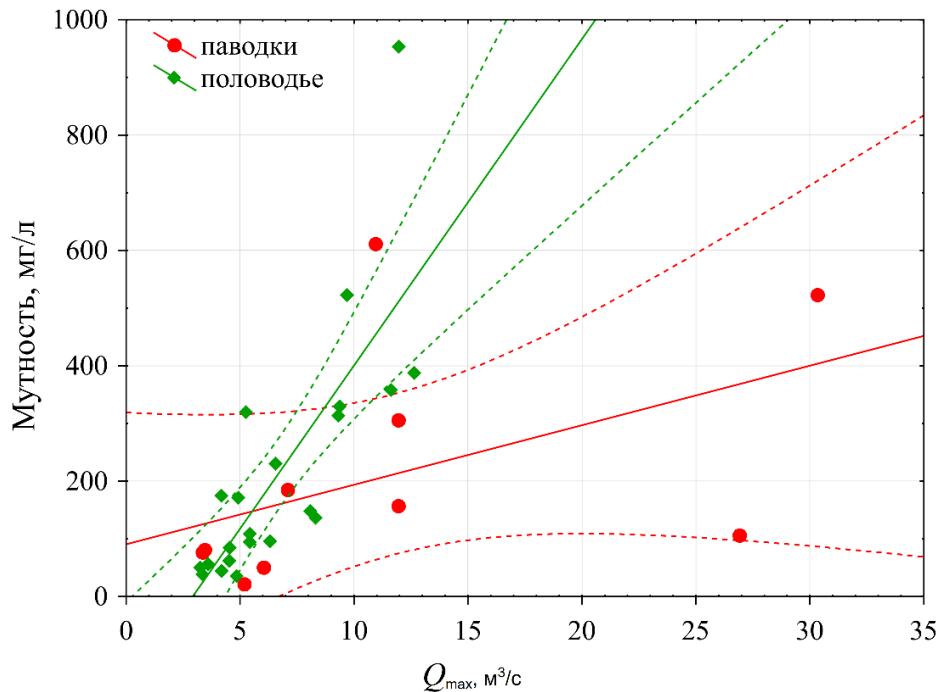


Рисунок 5.6. Связь максимальных расходов воды и мутности во время половодья и паводков для станции С10 (сплошная линия – линия регрессии, пунктирные линии – 95% доверительный интервал)

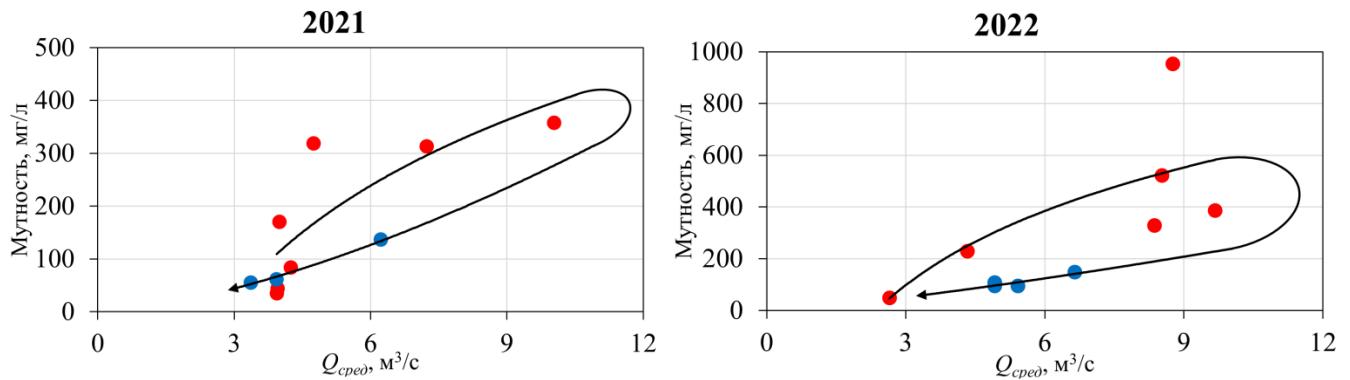


Рисунок 5.7. Петля гистерезиса зависимости мутности воды от расхода в половодье 2021 (слева) и 2022 (справа) гг. (для станции С10) (красные точки – фаза подъёма, синие точки – фаза спада; значения расхода представляют собой суточные средние расходы, значения мутности – суточные средние концентрации ВВ в результате пробоотбора)

Для половодья 2021 г. петля гистерезиса была слабо выраженной: на фазах подъема и спада при одинаковых расходах мутность оставалась близкой, а максимальные значения мутности (358 мг/л) и расходов воды (11,63 м³/с) достигались одновременно. Иная ситуация наблюдалась в половодье 2022 г., когда сформировалась выраженная петля обратного

гистерезиса. Мутность на фазе подъёма расхода существенно превышала значения на спаде при тех же расходах. Пик мутности (953,5 мг/л) был зафиксирован 11 апреля, опережая пик расходов (12,65 м³/с, 12 апреля) на одни сутки.

Анализ петель гистерезиса показывает, что на урбанизированных водосборах временные изменения мутности зависят не только от расхода воды, но и от особенностей поступления и распределения ВВ.

Средняя мутность воды в устье р. Сетунь (С10) за период 2019–2023 гг. оценивается величиной 110 мг/л, что существенно превосходит фоновые региональные показатели. Для сравнения, по данным [Караушев, 1977], для рек лесной зоны Русской равнины средняя мутность составляет около 35 мг/л при лесистости водосборов от 35 до 90%. Согласно результатам исследований [Бобровицкая и др., 2008], типичные значения мутности вод находятся в диапазоне 25–50 мг/л для региона. Хотя эти значения основаны на данных государственной гидрологической сети, результаты полевых наблюдений [Чалов, Ефимов, 2021], выполненных на самой Москве-реке выше городской черты, показывают значительно меньшую мутность – в пределах 9–24 мг/л.

Интенсивность твёрдого стока р. Сетунь также существенно превышает региональные значения. По данным проведённых измерений, годовой сток наносов составляет 8401 т/год, модуль стока наносов – 44,2 т/км²×год, расход наносов – 0,27 кг/с. Для региональной оценки использованы данные мутности воды на гидрологических постах бассейна верхней Оки: р. Оке в г. Калуга (площадь водосбора 54,9 тыс. км²) и р. Жиздре в г. Козельск (площадь водосбора 6,94 тыс. км²). На этих створах за период 2000–2008 гг. средний модуль стока наносов составляет 4,2 т/км²×год. Модуль стока наносов р. Сетунь превышает этот региональный уровень в 10,5 раз. Для рек лесной зоны Русской равнины модуль стока наносов, по данным [Караушев, 1977], составляет в среднем 8 т/км²×год, что в 5,5 раз ниже, чем для урбанизированного бассейна р. Сетунь.

Особенно показательно сравнение с р. Путилка (створ д. Малахово), площадь водосбора которой (182 км²) практически идентична площади бассейна р. Сетунь (190 км²). По данным [Дедков, Мозжерин, 1984], модуль стока наносов для р. Путилка составляет 4,4 т/км²×год, что означает десятикратное превышение этого показателя для р. Сетунь. Такая разница при сопоставимых размерах водосборов подчёркивает определяющую роль урбанизации в формировании повышенного твёрдого стока в условиях городской застройки.

Для сравнительной оценки стока ВВ также были использованы данные мониторинговой кампании, проведённой на Москве-реке в разные периоды: март и август 2020 г., а также февраль и апрель 2021 г. Отбор проб воды с последующим анализом концентрации ВВ и гранулометрического состава осуществлялся в 45 створах, которые были условно разделены на

4 группы по расположению относительно городской агломерации. Первая группа включала 10 точек, расположенных до границы Московской агломерации, вторая – 16 точек внутри агломерации до района Курьяново, где расположены очистные сооружения, третья – 10 точек в пределах агломерации после Курьяново, и четвёртая – 9 точек ниже агломерации до г. Коломны (**Рисунок 5.8**). Помимо этого, пробоотбор осуществлялся на р. Лусянке, водосбор которой рассматривался в настоящей работе как аналог водосбора р. Сетунь в естественных условиях.

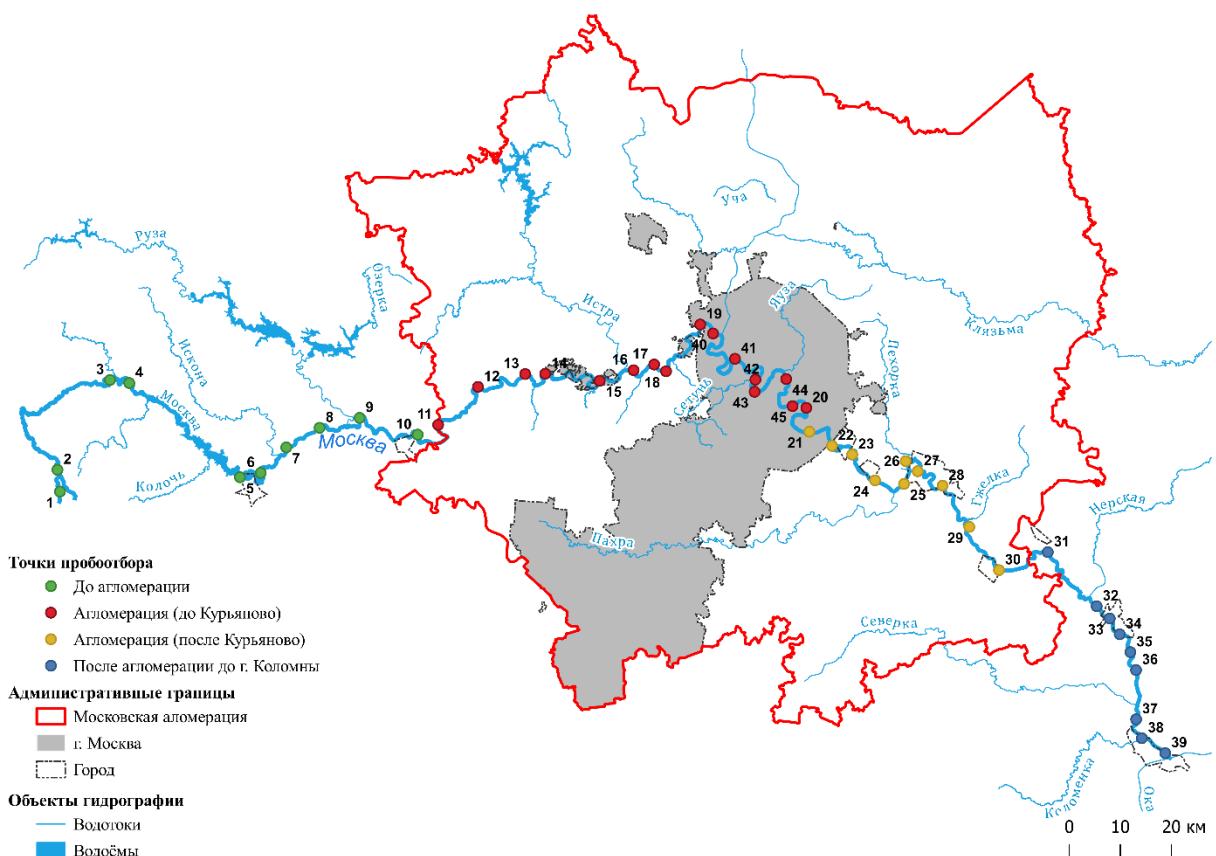


Рисунок 5.8. Пробоотбор на Москве-реке в 2020–2021 гг.

В ходе анализа мутности воды на различных участках Москвы-реки и р. Сетунь выявлены существенные различия в концентрации ВВ. При интерпретации результатов необходимо учитывать различия в гидравлических условиях этих водотоков. Москва-река на большей части своего протяжения зарегулирована и представляет собой каскад водохранилищ с низкими скоростями течения, что способствует активному осаждению ВВ. Сетунь, напротив, сохраняет естественный речной режим с более высокими скоростями течения и транспортирующей способностью.

В естественных условиях верхних участков Москвы-реки (до границы агломерации) средняя мутность составила 12,3 мг/л (медиана 9,2 мг/л) (**Рисунок 5.9**), с максимальным значением до 40 мг/л, что обусловлено минимальным антропогенным воздействием. По мере продвижения внутри городской агломерации до очистных сооружений в Курьяново

наблюдается незначительный рост мутности – среднее значение достигает 13 мг/л (медиана 11,4 мг/л), максимумы варьируются до 36,2 мг/л. После Курьяново в пределах агломерации мутность увеличивается до средней 16,8 мг/л (медиана 13,5 мг/л) с пиками до 70,4 мг/л (определён как выброс), что может быть связано с поступлением сбросов с очистных сооружений и усилением антропогенного влияния. На участке после выхода из агломерации до города Коломны средняя мутность составила 15 мг/л при медиане 16,3 мг/л и максимуме 27,6 мг/л, что может указывать на частичное разбавление загрязнённых сточных вод.

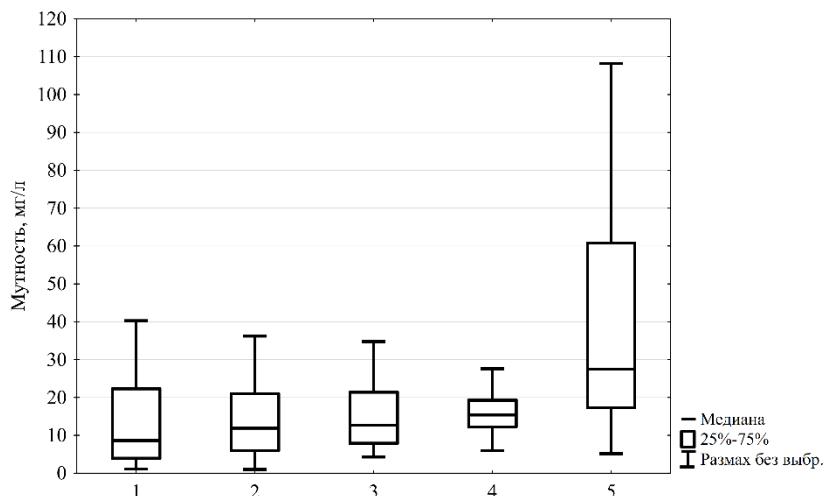


Рисунок 5.9. Диапазоны мутности Москвы-реки (1–4) и р. Сетунь (5) на различных участках:
1 – до агломерации, 2 – агломерация (до Курьяново), 3 – агломерация (после Курьяново),
4 – после агломерации до г. Коломны, 5 – р. Сетунь (С10)

Для более корректной оценки влияния урбанизации показательным является сравнение р. Сетунь с р. Лусянкой, рассматриваемой как условный естественный аналог. Обе реки представляют собой малые водотоки с сопоставимыми гидравлическими характеристиками. Средняя мутность р. Сетунь (60,2 мг/л, медиана 24,6 мг/л) почти вдвое выше мутности Лусянки (32,9 мг/л, медиана 22,5 мг/л), что указывает на существенное влияние урбанизации водосбора на формирование стока ВВ. При этом максимальные значения мутности р. Сетунь достигают 174,7 мг/л, что в 2 раза выше максимумов для Лусянки (84,6 мг/л).

5.2. Характеристика состава взвешенных наносов р. Сетунь

Анализ гранулометрического состава ВВ в водах рр. Москвы, Сетуни и Лусянки свидетельствует о выраженном влиянии урбанизации и антропогенных факторов на распределение размеров частиц (Таблица 5.5). Для большинства участков Москвы-реки и Лусянки преобладают частицы среднего размера – в диапазоне 0,01–0,1 мм, доля которых варьируется от 43,5% до 57,3%. Фракция мелкодисперсных частиц размером 0,001–0,01 мм

занимает порядка 28–39%, при этом доля очень мелких (<0,001 мм) стабильно невелика и составляет около 3%. Доля крупных частиц (>0,1 мм) колеблется от 8,7% (Лусянка) до 20% (верховья Москвы-реки) и демонстрирует тенденцию к снижению вниз по течению, что может быть связано с перераспределением наносов в условиях городской застройки.

Таблица 5.5

Доля наносов (%) различной крупности (мм)

Река	Участок	<0,001	0,001–0,01	0,01–0,1	>0,1	d_{50}
Москва	до агломерации	3,5	33	43,5	20	0,171
	Агломерация (до Курьяново)	3,5	33,5	51,1	11,9	0,115
	агломерация (после Курьяново)	3,2	28,9	53,1	14,8	0,140
	после агломерации до г. Коломны	3,0	29,6	57,3	10,1	0,108
Лусянка	д. Поминово	3,2	38,6	49,5	8,7	0,087
Сетунь	C10	6,1	57,4	30,6	5,9	0,032
Среднее по рекам РФ		4	37	44	15	0,083

Для р. Сетунь характерно уменьшение крупности звезды: доля частиц размером 0,001–0,01 мм достигает 57,4%, что значительно выше, чем в других реках и в среднем по России (37%) [Чалов, Ефимов, 2021]. Одновременно заметно снижается содержание частиц среднего размера (0,01–0,1 мм) – всего 30,6%, а доля крупных частиц (>0,1 мм) минимальна – 5,9% по сравнению со средним уровнем 15% по российским рекам. Медианный диаметр частиц (d_{50}) в р. Сетунь составляет 0,032 мм, что почти в 3 раза меньше среднего по рекам РФ (0,083 мм) и значительно ниже, чем у Москвы-реки и Лусянки. Такая структура свидетельствует о выраженным сдвиге гранулометрического состава в сторону тонкодисперсных наносов в условиях сильной урбанизации и антропогенного воздействия. Доминирование мелких фракций во ВВ связано с поступлением иловых и глинистых частиц из городских и промышленных стоков.

Анализ гранулометрического состава наносов малых городских рек играет важную роль в контексте понимания их основных источников поступления. Согласно [Алексеевский, 1998], диаметр взвешенных частиц, соответствующий переходу от одного максимума гранулометрической кривой к другому, можно рассматривать в качестве граничного значения между бассейновой эрозией и русловыми деформациями.

В гранулометрическом составе частиц крупнее 0,45 мкм речных наносов р. Сетунь во всех створах доминируют частицы в диапазоне от 0,001 до 0,05 мм, составляющие суммарно около 88–90% от всей массы пробы (Таблица 5.6), что говорит о преобладании мелкодисперсных и средних по размеру звезд (глина, ил, мелкий песок). При этом доля

частиц размером 0,001–0,005 мм увеличивается вниз по течению, тогда как доля частиц крупностью 0,01–0,05, наоборот, уменьшается. Содержание частиц <0,001 мм изменяется в диапазоне от 4,4% для С1 до 6,8% для С10, обуславливая тенденцию к небольшому увеличению вниз по течению доли глинистых частиц. Доля крупных частиц (>0,05 мм) незначительна – от 2,9% (С10) до 12,2% (С1). Таким образом, можно выделить несколько тенденций, связанных с продвижением вниз по течению р. Сетунь: процент глинистых частиц немного увеличивается, что может свидетельствовать о постепенном накоплении мелкодисперсных фракций вниз по течению; доля более крупных наносов уменьшается, что может быть связано с их ограниченным поступлением в нижних створах; доля илистых и пылеватых частиц остаётся практически стабильной с незначительными колебаниями.

Таблица 5.6

Доля наносов (%) различной крупности (мм) в р. Сетунь

Створ	<0,001	0,001-0,005	0,005-0,01	0,01-0,05	0,05-0,25	0,25-1	>1
	глина	мелкий ил	крупный ил	мелкая пыль	крупная пыль	мелкий песок	гравий
С1	4,4	30,2	17,1	36,0	7,8	3,7	0,7
С6	6,0	38,9	17,1	32,1	3,4	1,5	1,0
С2	5,7	37,4	18,0	34,3	2,2	1,2	1,1
С7	6,0	39,2	19,1	31,0	1,3	2,1	1,4
С8	6,2	38,0	19,0	33,9	1,0	1,1	0,7
С9	6,6	37,8	18,3	33,1	1,4	1,2	1,5
С10	6,8	39,1	19,3	31,9	0,5	1,2	1,2

Рисунок 5.10 демонстрирует, что характер гранулометрического состава ВВ практически не зависит от мутности и расходов воды, за исключением единичных «всплесков» более крупных частиц при экстремальных событиях. Анализ зависимости d_{50} от концентрации ВВ показывает отсутствие выраженной корреляции между этими параметрами. Большинство измерений характеризуется медианным диаметром частиц менее 0,05 мм независимо от значения мутности, варьирующего от 10 до 600 мг/л. Это указывает на доминирование тонкодисперсных фракций (глина, ил, мелкая пыль) в составе ВВ. Лишь единичные измерения при экстремально высокой мутности (более 100 мг/л) сопровождаются увеличением медианного диаметра до 0,1–0,4 мм, что соответствует появлению крупнопылеватых и мелкопесчаных частиц.

Зависимость медианного диаметра частиц от расхода воды также характеризуется слабой корреляцией и преобладанием мелких фракций во всем диапазоне гидрологических условий. При расходах от 2 до 10 м³/с медианный диаметр стабильно остается в пределах 0,01–

0,05 мм, что типично для илисто-пылеватых наносов. Даже при значительном увеличении расхода воды до 20–30 м³/с во время прохождения паводков и половодья основная масса ВВ сохраняет мелкодисперсный характер. Отдельные измерения с d_{50} до 0,25–0,4 мм при высоких расходах представляют редкие исключения, которые не формируют устойчивой закономерности. Скорее всего, они обусловлены локальными гидродинамическими процессами или специфическими источниками поступления более крупных частиц.

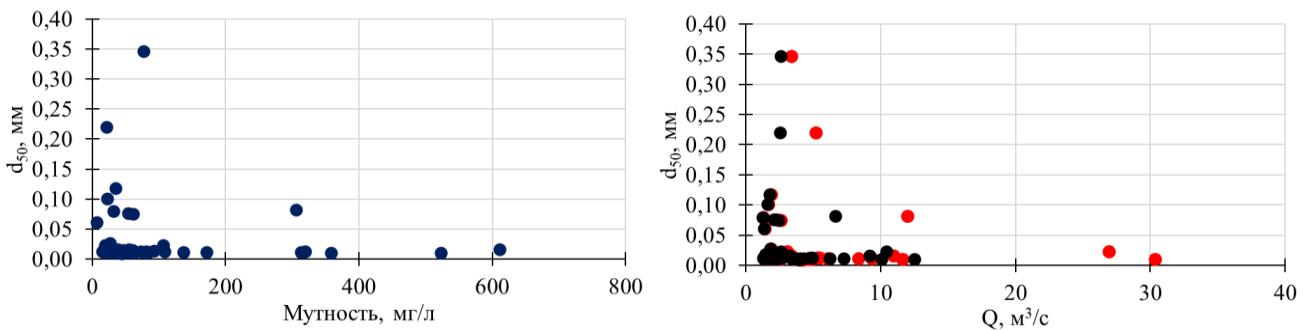


Рисунок 5.10. График связи медианного диаметра частиц и мутности (слева) и среднего диаметра частиц расходов воды (справа) (красные точки – максимальные расходы воды, чёрные – среднесуточные)

Для количественной оценки взаимосвязи между медианным диаметром частиц, мутностью и расходом воды было построено уравнение множественной регрессии (5.1):

$$d_{50} = 0,039 + 0,000011 \times SSC - 0,0025 \times Q_{\text{ср}} \quad (5.1)$$

где d_{50} – медианный диаметр частиц (мм), SSC – мутность (мг/л), $Q_{\text{ср}}$ – среднесуточный расход воды (м³/с). Крайне низкое значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,008$, $p\text{-value} = 0,80$) подтверждают полное отсутствие устойчивой связи между крупностью частиц и гидрологическими параметрами. Анализ зависимостей $d_{50} = f(SSC)$ и $d_{50} = f(Q)$ показал отсутствие статистически значимой связи – коэффициенты корреляции составили -0,07 и -0,09 соответственно.

Распределение гранулометрического состава имеет двухмодальную форму (**Рисунок 5.11**): первый пик приходится на фракцию 0,001–0,005 мм (мелкий ил) и достигает 38–43%, второй – на 0,01–0,05 мм (мелкая пыль), где доля частиц составляет около 26–33%. В некоторых случаях крупность взвеси слегка увеличивается (примерно до 5%) во время периодов прохождения паводков, что объясняется интенсификацией русловых деформаций, вызывающих поступление в поток более крупных русловых наносов.

По сравнению со средней кривой для рек РФ [Чалов, Ефимов, 2021] профиль р. Сетунь смещён в сторону тонкодисперсных фракций: доля ила и пылеватых частиц у неё в 2–3 раза

выше регионального уровня; при этом практически отсутствует нарастание грубообломочных компонентов (>0,25 мм), характерное для естественных водотоков. Разграничение гранулометрических зон на «бассейновую» (<0,01 мм) и «русловую» (0,01–0,05 мм) для р. Сетунь носит условный характер. В естественных водотоках перегиб кривой обычно чётче обозначает переход к доминированию русловых процессов, обуславливающих поступление наносов. В р. Сетунь же практически отсутствуют фазовые различия в профилях, что указывает на постоянное преобладание мелкодисперсных частиц, поступающих преимущественно с урбанизированного водосбора, и на низкую интенсивность типичных русловых эрозионных процессов. Таким образом, гранулометрический состав взвеси в р. Сетунь равномерен вне зависимости от ФВР, что подтверждает предположение о постоянстве основных источников наносов в р. Сетунь в течение года. Эта устойчивость обусловлена значительной долей мелких частиц, поступающих с дорожной пылью и сточными водами, которые по размеру значительно мельче типичных продуктов эрозии.

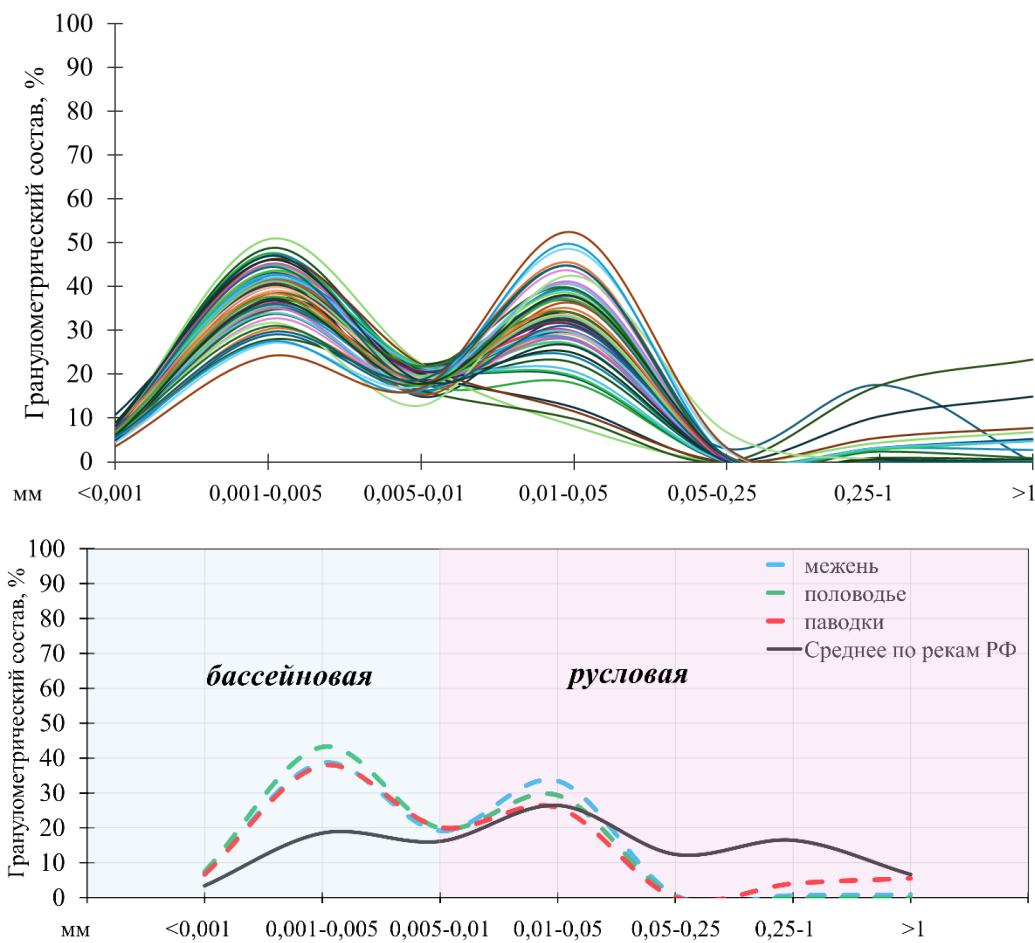


Рисунок 5.11. Гранулометрический анализ ВВ р. Сетунь (сверху) и осреднённые значения для разных ФВР (снизу) (заливкой показаны области бассейновой (голубой) и русловой (розовый) составляющих стока наносов)

Исследования источников речных наносов в урбанизированных бассейнах подчёркивают существенную роль антропогенных факторов, которые кардинально отличают эти системы от природных. Полученные результаты находят подтверждение в ряде зарубежных работ. Например, исследование [Yan et al., 2024] показало, что в городских ливневых стоках Канады доминируют мелкодисперсные частицы размером менее 0,125 мм, составляющие более 75% от общего объёма ВВ. Анализ урбанизированной части бассейна р. Эйр-Калдер в Великобритании выявил, что формирование ВВ происходит преимущественно за счёт нескольких источников: эрозии берегов, необработанной почвы, обработанной почвы, дорожных отложений и сточных вод. При этом суммарный вклад антропогенных источников – сточных вод и дорожных отложений – составил до 40% всех ВВ [Carter et al., 2003]. Аналогичные тенденции наблюдаются и в других регионах. Так, применение изотопного трассирования в городе Ухань (Китай) позволило определить, что примерно 60% ВВ поступают из дренажной системы (включая наносы из комбинированной канализации), а оставшиеся 40% – из дорожных отложений [Yin, Li, 2008].

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

Анализ и методы, изложенные в **Главах 1–5**, обеспечили глубокое понимание пространственно-временных закономерностей формирования стока воды и ВВ в бассейне р. Сетунь, что стало основой для успешной адаптации модели Storm Water Management Model (далее – SWMM) в условиях городской среды. Использование многолетних высокочастотных наблюдений обеспечило репрезентативность входных параметров для моделирования, а выявленные особенности формирования паводочного стока в городской среде оказались критически важными для калибровки и верификации гидрологических и гидравлических модулей SWMM. Таким образом, интеграция результатов анализа водного стока и стока наносов становится необходимым предварительным условием для корректного рассмотрения диффузного смыва, сложность которого определяется многообразием источников и процессов переноса в урбанизированной среде.

Исследование диффузного смыва ЗВ с урбанизированных территорий приобретает всё большую актуальность в области городской гидрологии, поскольку является одним из наиболее сложных и мало контролируемых видов загрязнения. Поверхностные воды, стекающие с урбанизированной территории, формируются в результате выпадения на её поверхность атмосферных осадков и поступления поливо-моечных вод [Куприянов, 1977; Михайлов, 2000], богатых органическими и минеральными веществами [Johnson, Owen, 1971; Whipple, Hunter, Yu, 1974]. Значительная часть ЗВ поступает со смывом поллютантов с водосборных территорий. В отличие от точечных сбросов, которые могут быть контролируемы и регулируемы, диффузное загрязнение водоёмов практически не поддаётся прямому контролю и ограничению, а также характеризуется рассеянностью и разнообразием источников, что значительно усложняет его оценку. Его вынос определяется процессами водного и твёрдого стока, которые формируются атмосферными осадками, выпадающими на территории водосбора. Наличие, продолжительность и интенсивность осадков обеспечивают процессы высвобождения из почвы частиц твёрдого стока, а также их транспортировку вместе с сорбированными на них химическими веществами [Михайлов, 2000]. Согласно [Ясинский и др., 2023], формирование диффузного загрязнения на водосборах состоит из нескольких этапов: (1) формирование поверхностного склонового, внутрипочвенного и подземного стока; (2) эрозия почвы вследствие размыва талым или дождевым стоком; (3) насыщение потоков воды ЗВ и их адсорбция на частицах смытых наносов; (4) трансформация потоков веществ в пределах водосбора.

В результате процесса урбанизации создаётся особый антропогенный ландшафт, характеризующийся многообразием типов землепользования, а также большим количеством водонепроницаемых поверхностей. Каждый из этих ландшафтных элементов вносит свой вклад в формирование диффузного стока: с поверхности дорог и тротуаров смываются тяжёлые металлы, нефтепродукты, соли и различные микрочастицы; промышленные и жилые территории добавляют в этот поток химические соединения и патогены. Вынос ЗВ с городской территории и их концентрации в ливневом стоке во многом обусловлены теми процессами накопления поллютантов, которые происходят между ливнями. Очевидно, что чем большее времени прошло с момента последнего дождя, тем больше пыли, мусора и всех связанных с ними ЗВ аккумулировалось на улицах, тротуарах и крышах домов. В зарубежных исследованиях это явление характеризуется термином «the first flush effect» (эффект первого смыва), определяющим резкое изменение качества воды (концентрации ЗВ), которое происходит после выпадения первой порции дождя [Sartor et al., 1974]. Явление первого смыва является важным, но дискуссионным аспектом среди многих исследователей – вариативность данных может объясняться ограничениями в определении этого явления и подходе к его оценке [Bach et al., 2010; Zeng et al., 2019; Gao et al., 2023].

Стоки ливневых вод создают первый «грязный» смыв, в котором, помимо поллютантов из поверхностного стока, присутствуют твёрдые частицы, накопившиеся в самой канализационной системе. В периоды низких расходов, когда не происходит выпадения осадков, в системе происходит осаждение твёрдых частиц, однако во время прохождения паводков вновь наблюдается интенсификация их выноса. Одной из основных причин осаждения частиц в сточных водах являются особенности гидравлической конструкции канализационных систем – комбинированные канализационные сети рассчитаны на пропуск объёмов сточных вод, во много раз превышающих предполагаемый пиковый расход. В сухую погоду скорость потока и его транспортирующая способность слишком малы, чтобы перенести значительную часть ВВ, что позволяет им оседать. Однако после выпадения осадков за короткий промежуток времени сбрасывается большой объём ЗВ сверх того, что обычно переносится с поверхностным стоком. Так, в начальный период ливня концентрация твёрдых частиц в несколько тысяч миллиграммов на литр не является редкостью для канализационных стоков [Fan et al., 2003].

Оценка диффузного смыва является весьма сложной задачей, так как его интенсивность и состав меняются в зависимости от сезона, погодных условий, рельефа, особенностей землепользования и многих других факторов. ЗВ не только транспортируются поверхностным стоком, но могут подвергаться химическим и биологическим преобразованиям, взаимодействовать друг с другом. Например, твёрдый сток, попавший в канализационную сеть

с улиц, строительных площадок, промышленных зон и т. п., вносит значительное количество токсичных частиц, которые затем аккумулируются в условиях сухой погоды. Слой канализационных отложений подвергается ряду анаэробных биотрансформаций, в результате чего выделяется сероводород; затем он преобразуется в серную кислоту на внутренней поверхности труб, вызывая разрушение конструкций [Fan et al., 2003].

Размер частиц является одним из ключевых, но малоизученных факторов при оценке смыва с городских территорий, так как он влияет на скорость осаждения ВВ. В исследовании [Xiao et al., 2022] было выявлено, что в процессе смыва увеличивается их средний диаметр. Такое явление укрупнения частиц особенно заметно, когда дорога изначально покрыта очень мелкими наносами; кроме того, наличие крупных фракций замедляет перенос мелких. Этот эффект экранирования значительно влияет на процесс смыва на ранних стадиях дождя, в то время как в дальнейшем взаимодействие между частицами разного размера становится несущественным. Выявлены различия в процессе смыва частиц разных размеров: для глины и ила распределение размеров со временем существенно меняется – в начале преобладают более мелкие фракции, а затем более крупные. Для песка распределение размеров остаётся практически неизменным на протяжении всего процесса.

В отечественной практике первое обобщение проблем, связанных с диффузным смывом в городах, было выполнено в работе [Куприянов, 1977]. Несмотря на относительно небольшое количество исследований, для некоторых российских городов уже выполнялись экспериментальные исследования с целью оценки смыва ЗВ. Значительный вклад в развитие этой области внесли учёные ИГ РАН [Китаев, 2001; Долгов, 2018; Ясинский, 2019; Ясинский и др., 2023], ИО РАН [Кондратьев, Шмакова, 2019; Поздняков и др., 2020], ИВП РАН [Михайлов, 2000; Данилов-Данильян и др., 2012; Данилов-Данильян, 2020; Полянин и др., 2023]. В связи с этим оценка и прогнозирование диффузного смыва ЗВ в городских водосборах остаются сложной задачей, требующей развития методологических подходов и организации систематического мониторинга. На данный момент отсутствуют какие-либо официально утверждённые методы расчёта диффузного стока ЗВ вследствие многообразия процессов и недостаточной изученности состояния урбанизированных рек [Ясинский и др., 2023].

6.1. Реализация гидрологического блока модели SWMM

Формирование паводочного стока р. Сетунь воспроизвело с использованием динамической модели формирования дождевого стока SWMM. Она была разработана Агентством по охране окружающей среды США в 1970-х гг. [Rossman, Simon, 2022]. SWMM позволяет проводить как одноразовые (событийные), так и долгосрочные симуляции количества и качества стока, преимущественно в городских районах, но также может

применяться на неурбанизированных территориях. С помощью данной модели возможно воспроизводить динамику стока и распределение ЗВ на водосборной площади, включая оценку их выноса с сельскохозяйственных полей, городских территорий и других источников, что критически важно для понимания масштабов диффузного загрязнения.

SWMM подразделяется на несколько блоков-подпрограмм, которые позволяют моделировать большинство количественных и качественных характеристик гидрологического цикла на урбанизированной территории. Данная модель позволяет анализировать процессы в ливневых системах, комбинированной канализации и естественных дренажных системах. Процесс формирования стока на урбанизированной территории, или расчёт гидрографа, моделируется на основе подхода нелинейного резервуара, в котором также предусмотрена возможность учёта снеготаяния. В зависимости от поставленных задач сток воды может описываться более сложными моделями, чем модель нелинейного резервуара (кинематическая волна, комплексные динамические уравнения).

Компонент стока SWMM работает с совокупностью элементарных подводосборов, которые получают осадки и генерируют сток и ЗВ. Часть моделирующей системы, связанная с маршрутизацией, транспортирует эти стоки через систему труб, каналов, резервуаров, очистных сооружений, насосов и регуляторов. SWMM отслеживает количество и качество стока, генерируемого в каждом подводосборе, а также скорость потока, уровень воды в трубах и каналах в течение периода моделирования с разбивкой на временные шаги.

При расчёте модель учитывает различные гидрологические процессы, которые приводят к образованию стока с городских территорий: изменяющиеся во времени осадки, испарение с водной поверхности, накопление и таяние снега, перехват и инфильтрация осадков, просачивание в слои грунтовых вод, перетоки между грунтовыми водами и дренажной системой, нелинейная маршрутизация поверхностного стока по элементарным подводосборам, перехват и накопление осадков и стока с помощью различных методов контроля. Пользователю необходимо задать входные параметры для калибровки имитационной модели. Исследуемая территория может быть разделена на любое количество элементарных подводосборов, каждый из которых стекает в одну точку. Размеры исследуемых территорий могут варьироваться. В качестве входных данных могут использоваться осадки с частотой один час или чаще, и модель может быть запущена для отдельных событий или в режиме непрерывного моделирования на протяжении нескольких лет.

6.1.1. Калибровка модели

Для определения гидрологических и гидравлических характеристик в бассейне р. Сетунь предложено разработать гидродинамическую модель, позволяющую рассчитывать скорости

потока в заданных точках русловой сети. Для выполнения модельных расчётов использован программный комплекс SWMM, ориентированный на расчёт ливневого стока в городской комбинированной канализационной системе.

SWMM представляет водосбор как прямоугольную поверхность с однородным уклоном S и шириной W , которая дренируется в единый выпускной канал [Rossman, Huber, 2016]. В рамках принятого подхода каждый элементарный водосбор рассматривается как система взаимосвязанных нелинейных резервуаров, где происходит накопление и перераспределение водных масс (**Рисунок 6.1**).

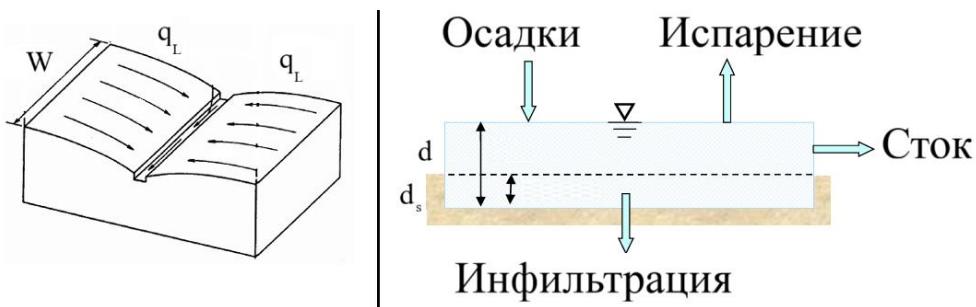


Рисунок 6.1. Идеализированное представление водосбора в SWMM (слева)
и его модель нелинейного резервуара (справа)

Математическое описание процессов основано на решении уравнения водного баланса (6.1):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (6.1)$$

где d – глубина слоя воды на поверхности водосбора; i – интенсивность атмосферного увлажнения; e – потери на испарение; f – инфильтрационные потери; q – интенсивность поверхностного стока.

Если предположить, что поток по поверхности водосбора ведёт себя как равномерный поток в прямоугольном канале шириной W , высотой $d - d_s$ и с уклоном S , то для выражения объёмного расхода стока Q можно использовать уравнение Маннинга (6.2):

$$Q = \frac{1,49}{n} WS^{1/2} (d - d_s)^{5/3} \quad (6.2)$$

где n – коэффициент шероховатости поверхности.

Учитывая неоднородность городской территории, модельная схематизация предусматривает разделение каждого водосбора на функционально различные зоны: (1) водопроницаемые участки – территории с естественным почвенно-растительным покровом, где происходят процессы инфильтрации; (2) водонепроницаемые участки с задержанием стока – застроенные территории с накоплением осадков в понижениях рельефа; (3) водонепроницаемые участки без задержания – поверхности с мгновенным формированием стока. Для каждого типа

поверхности решается индивидуальное уравнение баланса с соответствующими граничными условиями и параметрами. Суммарный сток с водосбора определяется как алгебраическая сумма вкладов от всех выделенных зон.

Таким образом, одна подобласть в модели может включать три типа элементов, как показано на **Рисунке 6.2**. При этом всё непроницаемое покрытие напрямую соединено с выпуском подобласти (обычно это дренажная труба или канал).

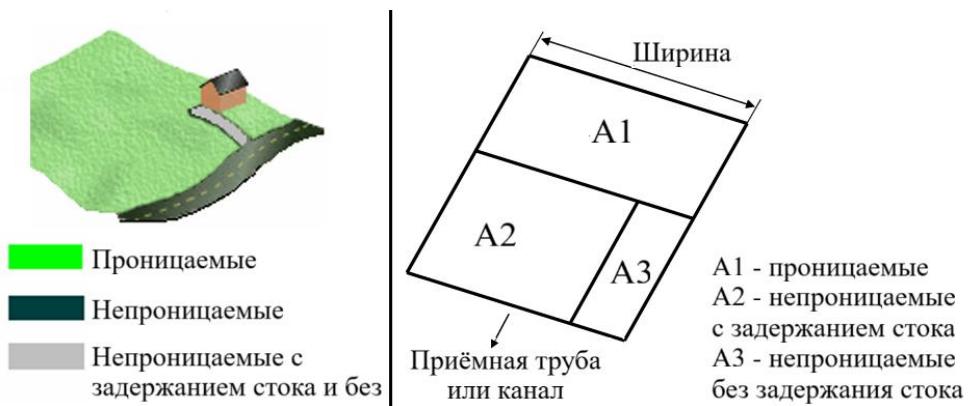


Рисунок 6.2. Типы подобластей в составе водосбора (слева) и идеализированное разделение водосбора для поверхностного стока (справа)

Сформированный на водосборных площадях поверхностный сток поступает в систему водотоков и искусственных водоводов, где происходит его дальнейшая трансформация. Для описания движения водных масс в русловой сети модель реализует алгоритм решения уравнения Сен-Венана (6.3–6.4):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\frac{Q^2}{\omega})}{\partial x} + g\omega \frac{\partial y}{\partial x} + g\omega S_f = 0 \quad (6.4)$$

где x – координата по длине водотока, t – время, ω – площадь поперечного сечения, Q – расход воды на рассматриваемом участке русла, g – ускорение свободного падения, $y = z + h$ – уровень свободной поверхности воды, z – отметка дна, h – глубина воды, S_f – уклон трения.

Уклон трения характеризует сопротивление; для учёта его сил применяется коэффициент Шези или коэффициент шероховатости Маннинга (6.5):

$$Q = \omega \frac{m}{n} (R)^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_f} \quad (6.5)$$

где R – гидравлический радиус, m – коэффициент, отражающий использование различных метрических систем для измерения длины ($m = 1$ м для системы СИ).

Коэффициент Шези связан с коэффициентом шероховатости зависимостью (6.6):

$$C = \frac{1}{n} (R)^{\frac{1}{6}} \quad (6.6)$$

Гидравлическая система, воспроизводимая гидродинамическим модулем, представляется в виде набора элементов двух основных типов: соединительные узлы и линейные элементы (водоводы). Для решения уравнений Сен-Венана задавались следующие граничные условия: верхнее граничное условие – приток воды с элементарных подводосборов, получаемый на основе модельных расчётов; нижнее граничное условие – уровень воды в Москве-реке, являющейся водоприёмником для р. Сетунь, согласно наблюдённым значениям на момент расчёта.

На первом этапе моделирования была выполнена сегментация бассейна на отдельные элементарные водосборы и проведён анализ ЦМР (цифровой модели рельефа), созданной на основе данных спутника ALOS с использованием съёмочного оборудования PALSAR и разрешением 12,5 м, в программном обеспечении ArcGIS (Рисунок 6.3). С учётом особенностей исследуемой территории весь водосбор был разделён на 20 элементарных подводосборов (Приложение 4), что обеспечивает достаточно детальную дискретизацию территории.

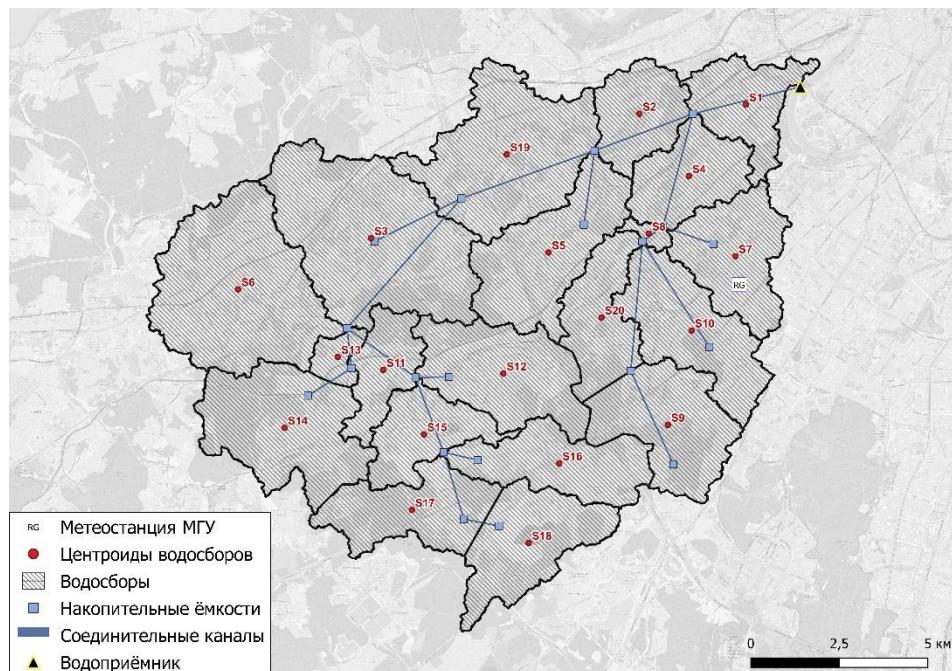


Рисунок 6.3. Фрагмент расчётной схемы водосбора р. Сетунь

Для наглядного представления полученных данных были составлены карты распределения исходных параметров моделирования для каждого подводосбора. Эти карты не только служат исходными данными для непосредственного моделирования, но и визуально отражают характеристики подстилающей поверхности. Уклоны подводосборов изменяются в диапазоне от 3–4% в верховье бассейна р. Сетунь до 6–7% в среднем течении и устьевой части (Рисунок 6.4). Максимальные значения уклонов наблюдаются в долине р. Раменки [Денисова, Болгов, 2025].

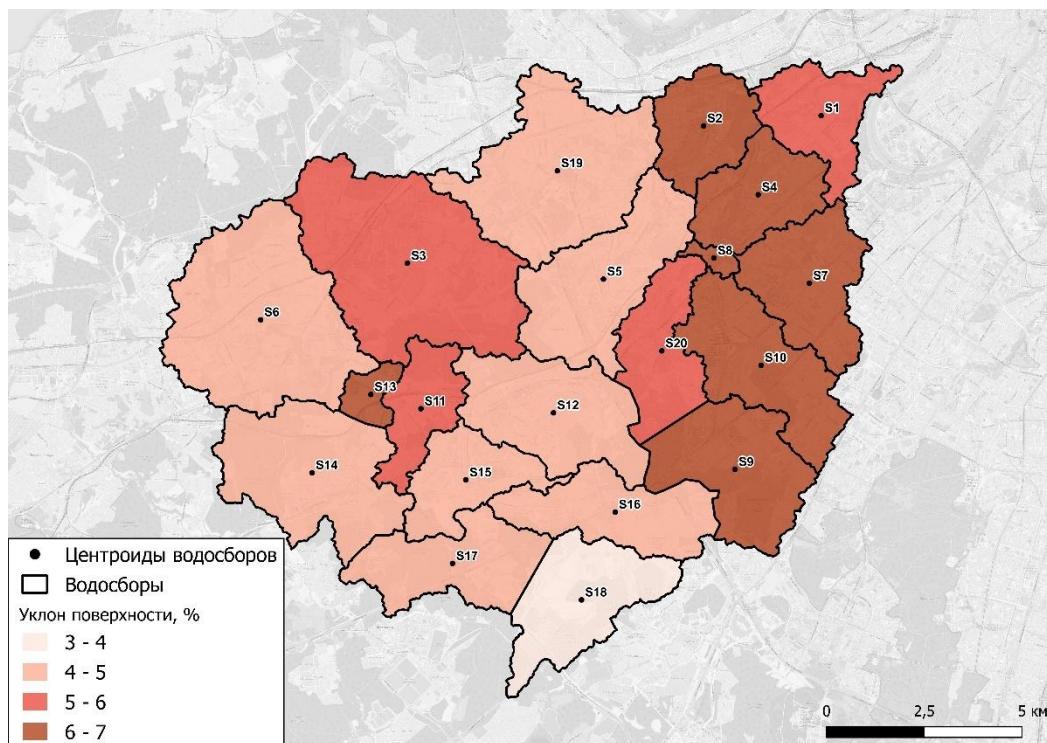


Рисунок 6.4. Уклон поверхности на территории бассейна р. Сетунь

На следующем этапе был выполнен расчёт доли непроницаемых территорий для определения части площади водосбора, на которой вода не проникает в грунт. Для этого использовались данные о застройке и площади дорог в пределах бассейна. Ширина дорог определялась в соответствии с их типом – внутридворовые, межрайонные, автомагистрали и другие – после чего создавались буферные зоны, которые затем суммировались с данными о застроенных участках. В результате доля водонепроницаемых поверхностей варьировалась от 5 до 20% площади отдельных подводосборов (**Рисунок 6.5**). Модель дополнительно была откалибрована с учётом наличия водоёмов, включая пруды, данные для которых были получены при обработке информации OpenStreetMap²⁶. Предполагалось, что поверхностный сток задерживается прудами перед поступлением в речную сеть р. Сетунь.

При настройке модели учитывалась дифференциация территории по категориям землепользования (**Рисунок 6.6**) согласно функциональному назначению участков. Коммерческие зоны включали территории, предназначенные для осуществления торгово-экономической деятельности: торговые комплексы, офисные центры, банковские учреждения, предприятия общественного питания, гостиничные комплексы и иные объекты сферы услуг. Жилые зоны представляли собой территории жилой застройки различной этажности и плотности, предназначенные для проживания населения. К промышленным зонам относились

²⁶ <https://data.nextgis.com/ru/catalog/subdivisions/?country=RU>

территории производственного назначения, включающие промышленные предприятия, заводы, фабрики, складские комплексы и объекты производственной инфраструктуры. Незастроенные территории составляли участки с минимальной степенью антропогенной трансформации, представленные лесными массивами, открытыми пространствами и естественными ландшафтами.

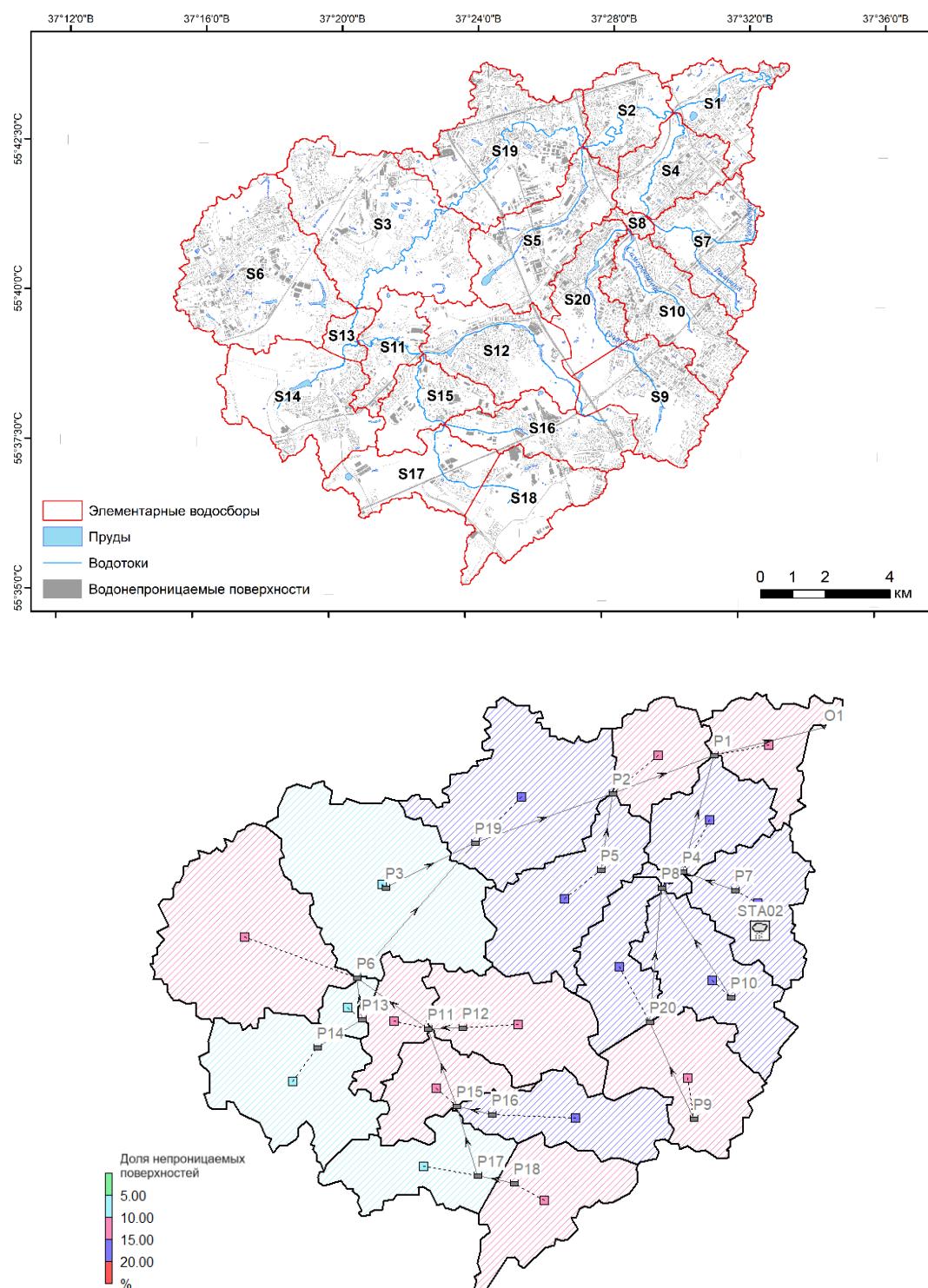


Рисунок 6.5. Карта-схема бассейна р. Сетунь, использованная для моделирования, построенная в ArcGIS (сверху) и в SWMM (снизу) (Р – водоудерживающие ёмкости)

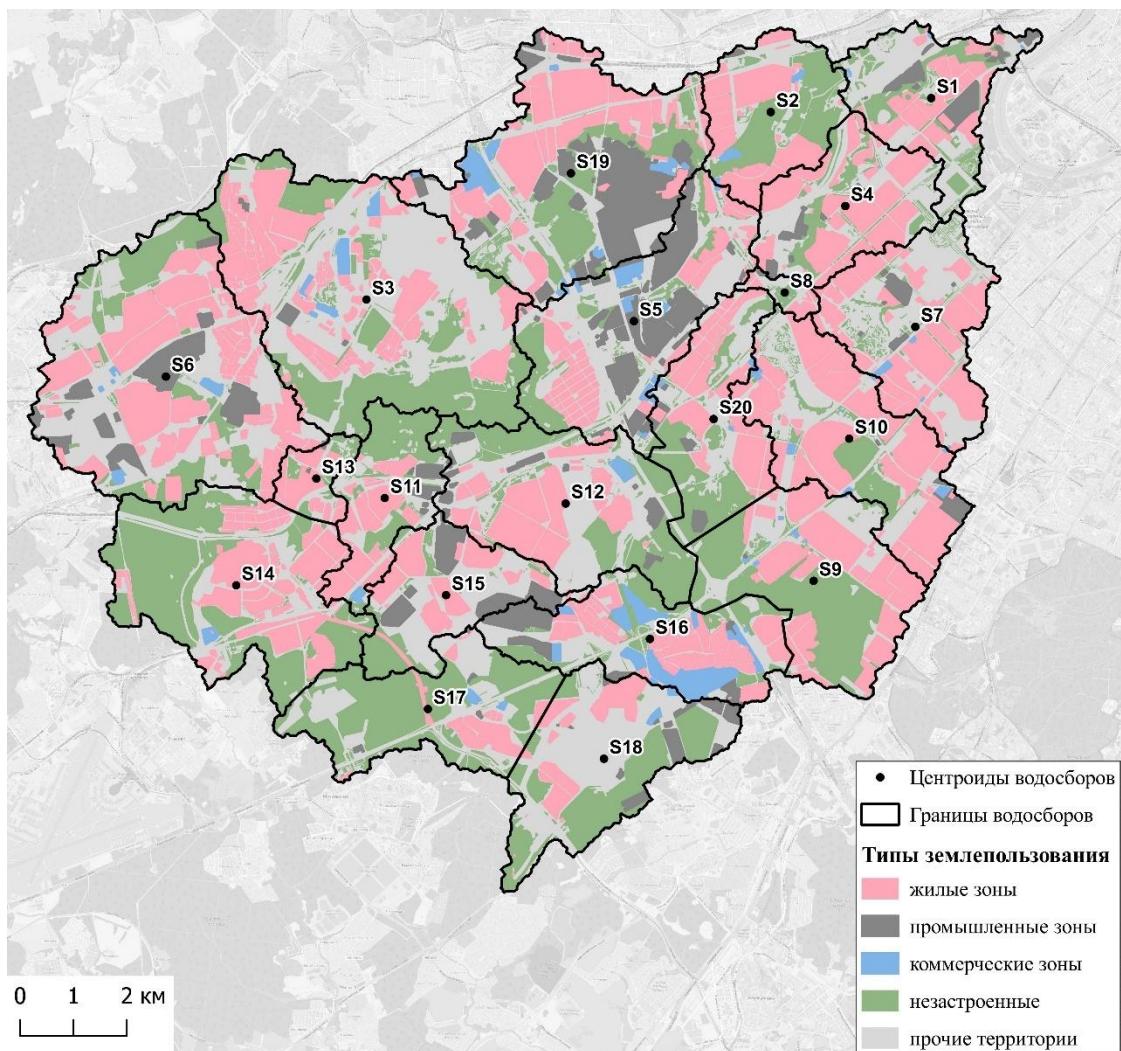


Рисунок 6.6. Типы землепользования в бассейне р. Сетунь

Потери на инфильтрацию на открытых участках вносят существенный вклад в водный баланс территории, в частности городской. Эти потери оценивают с помощью кривых впитывающей (инфильтрационной) способности, отражающих ход во времени интенсивности впитывания при непрерывном увлажнении поверхности. В программном обеспечении SWMM предусмотрены различные подходы к моделированию инфильтрации воды в почву. В рамках данного исследования применялся классический метод Хортона [Horton, 1940], демонстрирующий экспоненциальное снижение скорости инфильтрации от начальной максимальной скорости до некоторой минимальной скорости при продолжительных осадках. Для работы этого метода необходимы следующие входные параметры: максимальная и минимальная скорости инфильтрации, коэффициент затухания, отражающий скорость уменьшения инфильтрации с течением времени, а также время полного высыхания насыщенной почвы. В **Таблице 6.1** приведены калибровочные параметры, использованные при моделировании стока в бассейне р. Сетунь, выбранные на основе рекомендаций из [Rossman, Simon, 2022]. Данные о свойствах почв Московской агломерации и соответствующие

коэффициенты инфильтрации были получены с использованием Цифровой среднемасштабной почвенной карты Московского региона²⁷ и материалов из литературных источников [Gerasimova et al., 2024].

Таблица 6.1

Параметры калибровки гидрологического и гидравлического модуля SWMM

№	Параметр	Значения	Примечание
1	Доля непроницаемых покрытий (%)	7–19	
2	Максимальная скорость инфильтрации по кривой Хортона (мм/час)	25,4–42,3	Зависит от степени увлажнённости почвы, гранулометрического состава, типа растительности.
3	Минимальная скорость инфильтрации по кривой Хортона (мм/час)	3,3–30	Эквивалентна насыщенной гидравлической проводимости почвы.
4	Константа затухания скорости инфильтрации для кривой Хортона (1/час)	5	
5	Время в днях, необходимое для полного высыхания полностью насыщенной почвы	14	Типичные значения составляют от 2 до 14 дней.
6	Коэффициент Маннинга для непроницаемых поверхностей	0,011	
7	Коэффициент Маннинга для проницаемых поверхностей	0.3	
8	Коэффициент Маннинга для трубопроводов	0,01–0,03	

Для анализа были выбраны 16 наиболее характерных паводков (Таблица 6.2), зарегистрированных в результате мониторинга в створе С5. Для каждого паводка были определены параметры стока, включая общий объём, слой стока, максимальный расход, модуль стока, а также длительность паводка. Далее был выполнен анализ осадков, формирующих сток: рассчитывался суммарный слой осадков за период дождя, его продолжительность, средняя интенсивность и максимальная интенсивность осадков за 30 минут. При моделировании данные кригинга использовались как основные, если суточная сумма осадков по нему превышала значения МО МГУ. В таких случаях плювиографические данные корректировались путём приведения к значениям кригинга.

В результате анализа чувствительности модели были выявлены ключевые параметры, такие как доля непроницаемых поверхностей и присутствие водоудерживающих объектов (прудов). После этого была проведена калибровка менее значимых параметров, включая учёт предшествующего уровня влажности в бассейне (период между дождями). Процесс калибровки

²⁷ <https://soil-db.ru/map/moscow-region>

заключался в итеративном подборе параметров до достижения совпадения между смоделированными и фактическими измерениями расхода воды [Денисова, Болгов, 2025].

Таблица 6.2

Периоды моделирования паводочного стока в бассейне р. Сетунь

№	Дата	Продолжительность паводка, ч	Максимальный расход Q_{max} , м ³ /с		Слой осадков, мм	Метео-данные
			Фактич.	Смоделир.		
1	20.06.2020	10,5	26,9	14,8	33,8	МО МГУ
2	08.05.2021	20	17,9	15,6	59,5	Кригинг
3	27.05.2021	15	7,1	11,0	8,9	МО МГУ
4	27.06.2021	6	10,7	11,1	12,8	МО МГУ
5	28.06.2021	12,5	30,3	17,1	43,4	МО МГУ
6	01.07.2021	6,5	6,0	11,0	5,4	Кригинг
7	17.07.2021	7	9,0	11,0	4,7	Кригинг
8	30.07.2021	9	6,6	11,0	6,3	Кригинг
9	03.08.2021	9	15,3	11,3	19,4	МО МГУ
10	12.08.2021	28,3	16,0	12,8	43,8	Кригинг
11	18.08.2021	12	14,4	11,3	18,6	Кригинг
12	03.09.2021	9	12,8	11,1	11,7	МО МГУ
13	20.09.2021	12	8,2	11,0	29,5	Кригинг
14	15.10.2021	12,5	7,9	11,2	25,9	Кригинг
15	22.09.2022	18,5	10,8	11,0	12,3	Кригинг
16	27.07.2023	34,5	26,6	17,9	64,6	Кригинг

6.1.2. Верификация модели

Для оценки результатов моделирования применялись статистические показатели: относительная погрешность максимальных расходов (R_E) и коэффициент детерминации (R^2). Эти параметры вычислялись по формулам (6.7–6.8) соответственно:

$$R_E = \frac{|Q_{max}^{факт} - Q_{max}^{модел}|}{Q_{max}^{факт}} \times 100\% \quad (6.7)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{факт} - Q_t^{сред.факт})(Q_t^{модел} - Q_t^{сред.модел})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{факт} - Q_t^{сред.факт})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{модел} - Q_t^{сред.модел})^2}} \right)^2 \quad (6.8)$$

где $Q_t^{факт}$ – фактический расход в момент времени t , $Q_t^{модел}$ – смоделированный расход в момент времени t , $Q_t^{сред.факт}$ – средний фактический расход в момент времени t , $Q_t^{сред.модел}$ – средний смоделированный расход в момент времени t , $Q^{факт}$, $Q_{max}^{факт}$ – максимальный фактический и смоделированный расход, t – время, n – общее количество временных шагов.

Относительная погрешность R_E представляет собой процентное отношение абсолютной ошибки к фактическим значениям и служит показателем надёжности прогнозируемых данных. Согласно критериям количественной оценки, калибровка модели считается хорошей, если

среднее значение R_E не превышает 30%, и удовлетворительной при среднем R_E до 60% [Chow et al., 2012].

Коэффициент детерминации R^2 отражает, насколько точно модель воспроизводит наблюдаемые значения, измеряя долю вариации результатов, объясняемую моделированием [Li et al., 2016]. Для проверки значимости результатов использовался тест Манна-Кендалла с уровнем значимости $p\text{-value}$ 5%. При значении $p\text{-value}$ выше 0,05 нулевая гипотеза принималась. Интерпретация значений R^2 осуществлялась следующим образом: $0,01 \leq R^2 \leq 0,09$ – недостаточно подтверждённая связь, $0,09 \leq R^2 \leq 0,49$ – средняя (умеренная) связь, $0,49 \leq R^2 \leq 1$ – достаточно сильная связь. Данный параметр также рассчитывался для всего ряда максимальных фактических и смоделированных расходов, т.е. для всей совокупности паводков.

6.1.3. Моделирование дождевых паводков на р. Сетунь

Для оценки влияния метеорологических факторов на объём стока в экспериментальном режиме были созданы два сценария моделирования: один с использованием данных осадков только одной МО МГУ, и другой – с применением метода кригинга, который осуществляет интерполяцию данных с нескольких метеостанций в центральную точку водосбора. Результаты показали, что использование данных с одной метеостанции приводит к низкой точности моделирования и заметному занижению смоделированных расходов воды в устьевом створе (Рисунок 6.7).

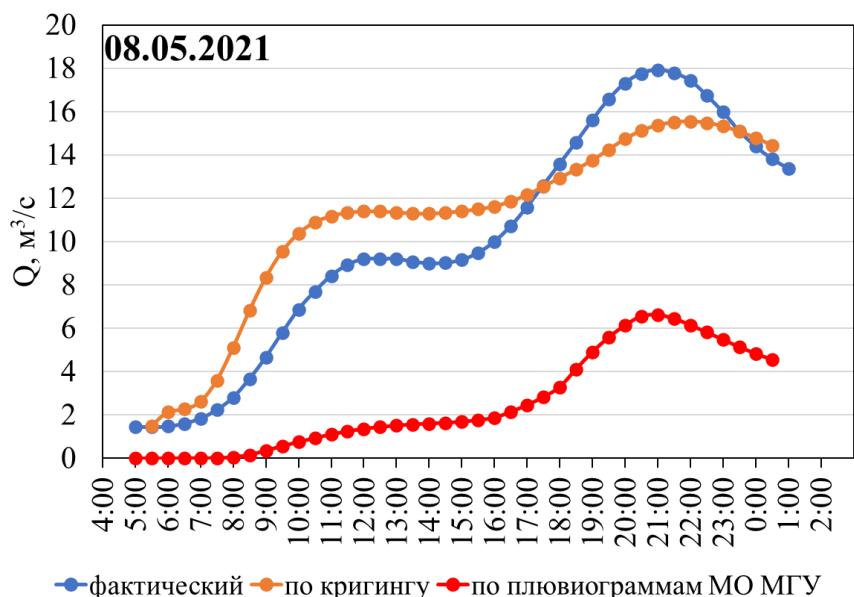


Рисунок 6.7. Сравнение фактических и смоделированных в SWMM расходов воды

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 (**Рисунок 6.8**). Тем не менее, в некоторых случаях моделируемые значения расходов слабо отражают динамику наблюдаемых данных. Такая ситуация может быть связана с ограниченной точностью пространственного распределения интенсивности осадков, поскольку на территории водосбора наблюдается значительная неравномерность осадков, а применяемый метод кrigинга не всегда обеспечивает полную достоверность результатов.

Характерное время добегания поверхностного стока для бассейна р. Сетунь составляет 6–8 ч, что связано с наличием на территории большого количества водонепроницаемых поверхностей, уменьшающих инфильтрацию в почву и обеспечивающих быстрый приток осадков в речную сеть [Чалов и др., 2023а]. При учёте степени урбанизированности территории, то есть доли непроницаемых поверхностей, калибровка модели выявила резкий рост расходов, после которого наблюдается достаточно быстрое снижение стока.

В **Таблице 6.3** приведены результаты статистической оценки качества моделирования. В качестве критериев оценки использовались относительная погрешность R_E и коэффициент детерминации R^2 . Для большинства паводковых событий значения R_E находились в диапазоне от 18% до 44%, что свидетельствует о хорошем или удовлетворительном качестве модели. Исключением стали паводки от 01.07.2021 и 30.07.2021, для которых R_E достигала 82% и 66% соответственно. Вероятно, такие результаты связаны с относительно небольшим пиковым расходом воды (6,0–6,6 м³/с) и малым количеством стокообразующих осадков (5,4–6,3 мм), недостаточными для точного моделирования экстремальных гидрологических явлений. При этом модель продемонстрировала высокую точность прогноза для экстремальных паводков. Анализ показал сильную корреляцию между фактическими и смоделированными максимальными расходами для совокупности всех паводков ($R^2 = 0,82$) при средней относительной погрешности 33% (**Рисунок 6.9**).

Атмосферные осадки характеризуются значительной пространственной неоднородностью, меняющейся по площади покрытия, интенсивности и продолжительности, что зависит от их происхождения. В данном исследовании возникла необходимость оценить, насколько данные осадков, собранные на одной метеостанции (МО МГУ), отражают осадки на всей территории водосбора р. Сетунь. Очевидно, что измерения, проведённые в единственной точке, с определённой погрешностью описывают распределение осадков на значительной прилегающей площади. Для суммарного слоя осадков за короткие интервалы времени (менее суток) ошибка оценки может быть очень высокой: при наличии одного осадкомера на площадь от 100 до 500 км² погрешность варьируется в диапазоне от 42 до 70% [Гандин, Каган, 1976].

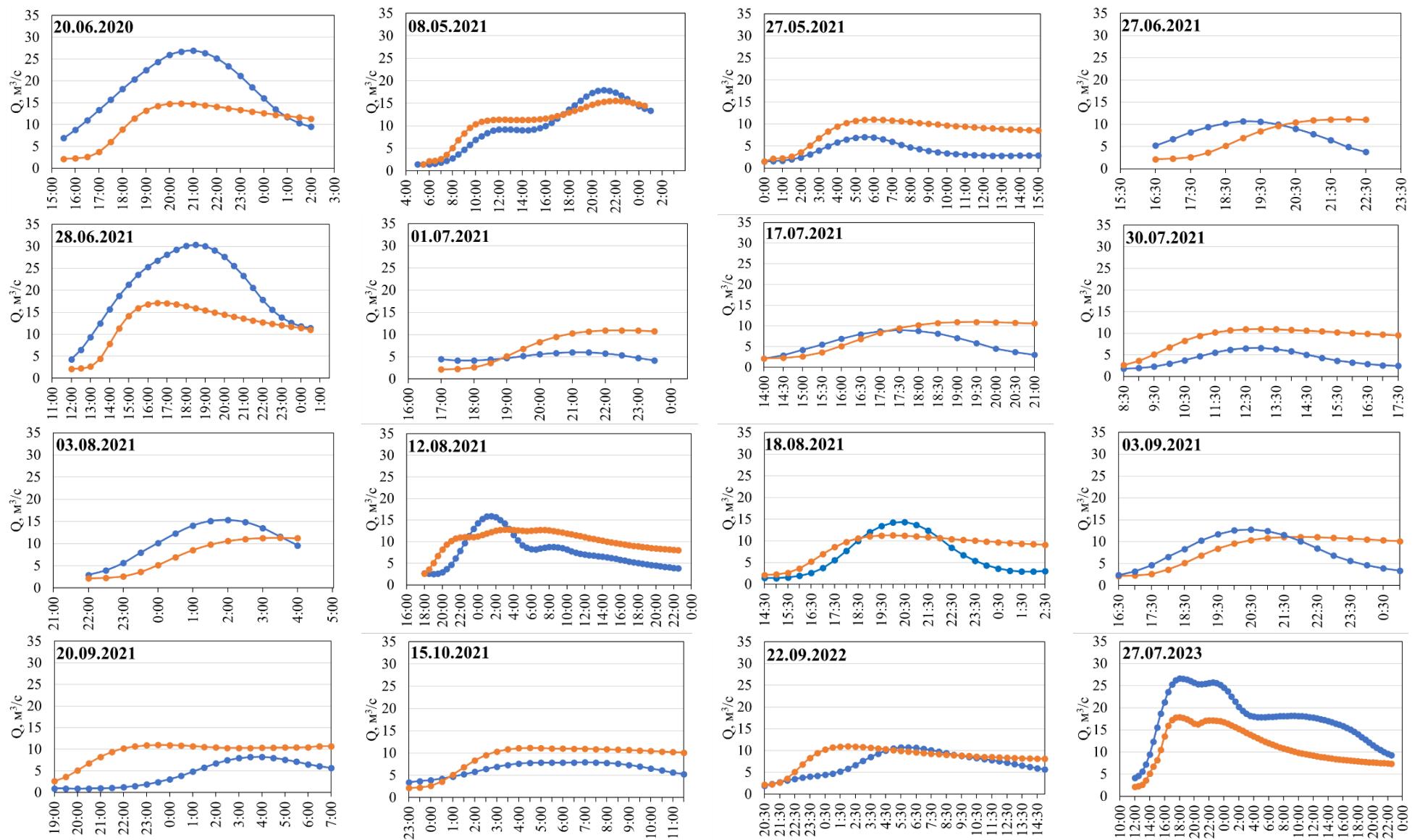


Рисунок 6.8. Фактические (синяя линия) и смоделированные (оранжевая линия) расходы воды в створе С5

Таблица 6.3

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

№	Дата	Re, %	R ²
1	20.06.2020	45	0,57
2	08.05.2021	13	0,89
3	27.05.2021	56	0,51
4	27.06.2021	4	0,02*
5	28.06.2021	44	0,77
6	01.07.2021	82	0,45
7	17.07.2021	22	0,17
8	30.07.2021	66	0,53
9	03.08.2021	26	0,72
10	12.08.2021	20	0,55
11	18.08.2021	22	0,54
12	03.09.2021	13	0,21
13	20.09.2021	33	0,30
14	15.10.2021	41	0,84
15	22.09.2022	2	0,42
16	27.07.2023	33	0,90

* p -value > 0,05

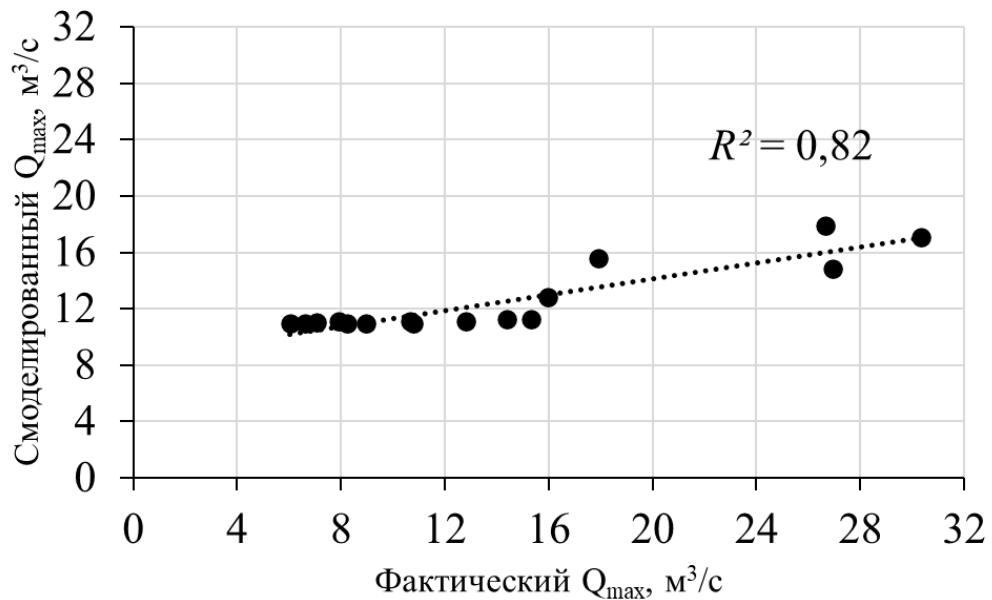


Рисунок 6.9. Связь между фактическими и смоделированными максимальными расходами воды

Анализ радиолокационных данных позволил провести оценку пространственной корреляционной функции интенсивности осадков конкретно для бассейна р. Сетунь за различные временные интервалы – 10 мин, 20 мин, 3 ч, 6 ч, 24 ч (Рисунок 6.10–6.11).

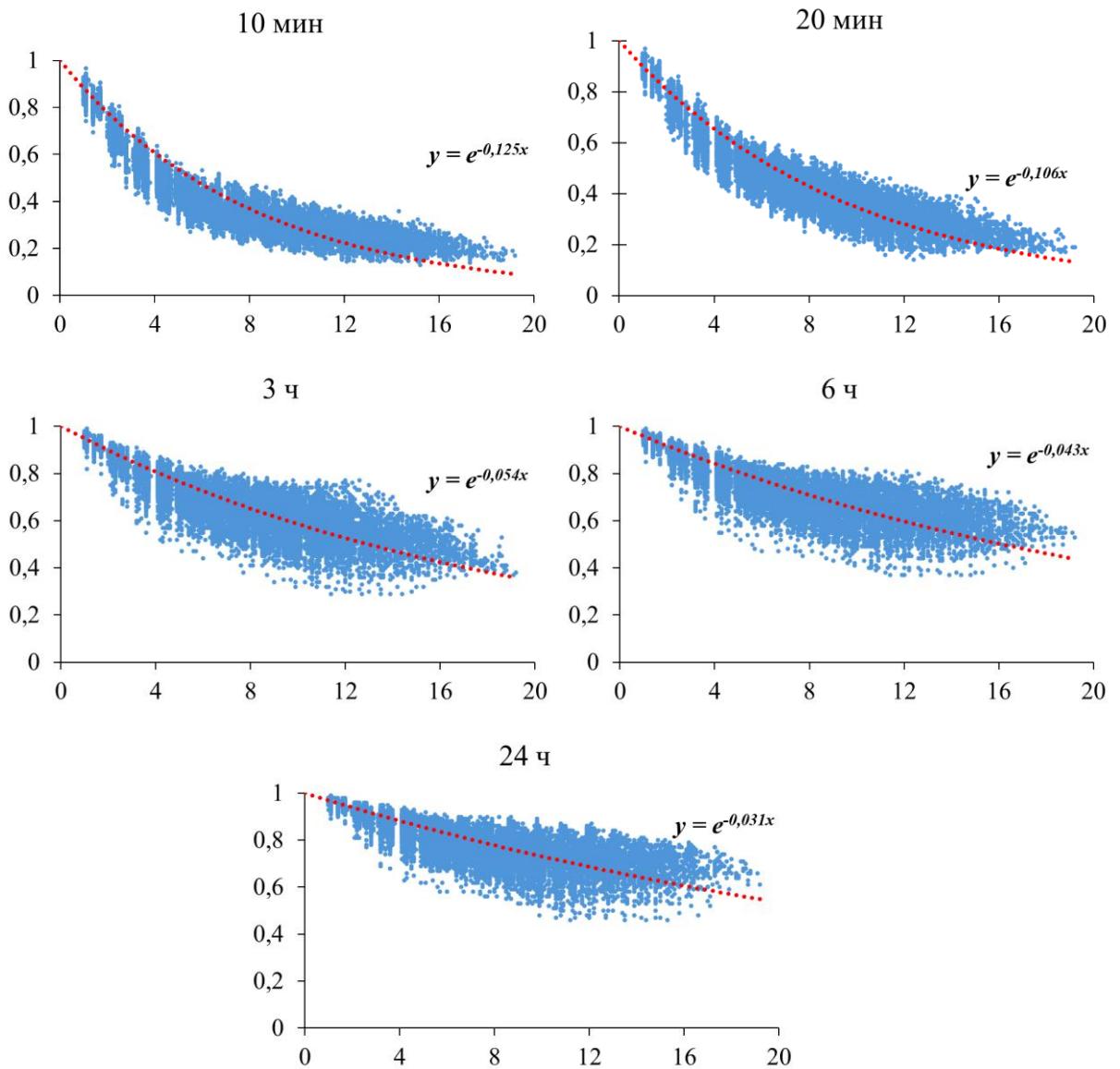


Рисунок 6.10. Оценка пространственной корреляционной функции интенсивности осадков
(ось у – коэффициент корреляции, ось х – расстояние, км)

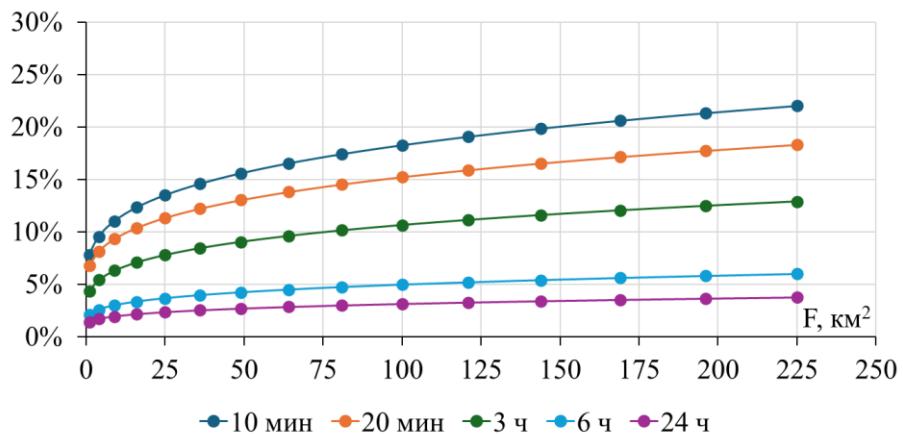


Рисунок 6.11. Средняя квадратичная погрешность интенсивности осадков
(ось у – погрешность по радарным данным, ось х – площадь интерполяции)

Можно отметить, что погрешность существенно уменьшается с увеличением временного интервала осадков. Для кратковременных осадков (10 и 20 мин) погрешность при интерполяции растёт вместе с площадью и достигает значений порядка 20% и 18% при площади до 225 км² соответственно. Для более длительных интервалов (3, 6 и 24 часа) ошибки значительно ниже и на больших площадях не превышают 13%, 6% и 4% соответственно. Для бассейна р. Сетунь с площадью 190 км² можно ожидать, что при интерполяции кратковременных и интенсивных осадков (10 или 20 мин) погрешность оценки будет достаточно высокой – 20% и выше. Учитывая, что для большинства событий относительная погрешность расчётов максимального расхода колебалась от 18% до 44% (среднее значение 33%), полученные результаты можно рассматривать как обладающие удовлетворительной степенью точности. При этом следует отметить, что погрешность гидрологической модели принципиально не может быть существенно меньше погрешности интерполяции исходных данных по осадкам, поскольку качество входной информации определяет верхний предел точности моделирования стока.

6.2. Реализация блока смыва модели SWMM

6.2.1. Калибровка и верификация модели

Блок качества воды в SWMM базируется на концепции «накопления и смыва» («Build-up/Washoff»). Количество накопленных поллютантов пропорционально длительности бездождного периода и отражает сложный комплекс процессов, включая, например, подметание улиц. Поскольку физические механизмы накопления плохо изучены, используемая модель имеет преимущественно эмпирическую природу [Ясинский и др., 2023].

Смыв ЗВ происходит в периоды осадков и может быть аппроксимирован экспоненциальной функцией, функцией рейтинговой кривой или функцией средней концентрации события [Rossman, Simon, 2022]. В настоящей работе для моделирования накопления и смыва ВВ была использована экспоненциальная функция, заданная уравнениями (6.9–6.10):

$$b = B_{\max}(1 - e^{-K_B t}) \quad (6.9)$$

где b – накопление вещества, кг/га; B_{\max} – максимально возможное накопление ЗВ, кг/га; K_B – константа скорости накопления, 1/сут; t – время накопления, сут.

$$W = K_w \times q^{N_w} \times m_B \quad (6.10)$$

где W – смытое количество вещества, кг/га·ч; K_w – коэффициент смыва, 1/мм; q – интенсивность стока с водосбора, мм/ч; N_w – показатель степени смыва; m_B – количество накопленного на поверхности ЗВ, кг/га.

Калибровка модели проводилась на основе 10 паводочных событий, для которых имелись данные мониторинга по расходу воды и мутности во время дождевых паводков (Таблица 6.4).

Таблица 6.4

Характеристика периодов моделирования смыва

Дата	Слой стока, мм	Время между дождями, дни	Слой осадков, мм	Интенсивность осадков		Q_{\max} , м ³ /с	Мутность, мг/л
				Сред. за дождь, мм/мин	Макс. за 30 мин, мм/30 мин		
08.05.2021	4,0	3,4	34	0,04	0,7	27	9,8
27.06.2021	0,8	11,8	13	0,3	2,3	18	49,6
17.07.2021	0,7	1,9	3	0,1	0,8	11	1,7
30.07.2021	0,7	0,4	5	0,04	0,7	10	20,9
03.08.2021	1,6	0,5	19	0,3	3,7	7	469,6
12.08.2021	2,2	0,1	23	0,04	0,9	17	248,1
18.08.2021	1,4	6,3	9	0,1	1,7	16	159,2
03.09.2021	1,2	0,5	12	0,1	2,1	16	42,3
20.09.2021	1,0	8,9	17	0,03	0,5	14	127,7
15.10.2021	1,5	0,1	11	0,02	0,3	8	32,3

Территория исследования была классифицирована на 4 категории землепользования: коммерческие, жилые, промышленные зоны и незастроенные территории (см. Рисунок 6.6). Данная классификация использовалась в гидрологическом моделировании и оказалась ключевой при настройке параметров накопления и смыва ВВ.

На первом этапе калибровки задавались ориентировочные диапазоны параметров (максимальное накопление, константа скорости накопления, коэффициент и показатель степени смыва), основанные на литературных данных. Начальные значения вводились в модель и корректировались в пределах заданных диапазонов (Таблица 6.5).

Таблица 6.5

Диапазоны параметров накопления и смыва, использованные для калибровки

Тип землепользования	Максимально возможное накопление ЗВ, кг/га	Константа скорости накопления, 1/сут	Коэффициент смыва	Показатель степени смыва
Жилые	0,1–400	0,4–6	0,5–20	0,5–2
Коммерческие	0,2–500	0,3–6	0,6–40	0,5–2,2
Промышленные	0,3–600	0,2–6	0,7–50	0,5–2,2
Незастроенные	0,03–250	0,2–6	0,2–10	0,3–1,5

На втором этапе была проведена ручная настройка наиболее чувствительных параметров: настройка велась до тех пор, пока значения, полученные в результате

моделирования, не приблизились к значениям, измеренным в полевых условиях. После этого калибровка продолжалась путём корректировки менее чувствительных параметров, что позволило достичь оптимальных параметров модели.

Помимо анализа 10 паводков (см. Таблицу 6.4), модель проверялась на длительном периоде с 1 мая по 28 октября 2021 г. и сравнивалась с результатами концентрации ВВ, полученными в результате пробоотбора, что позволило оценить адекватность модели на независимых данных. Лучшие результаты были достигнуты при применении медианных значений параметров накопления и граничных значений параметров смыва (минимального коэффициента смыва и максимального показателя степени смыва из диапазонов, полученных при калибровке) (Таблица 6.6).

Таблица 6.6

Параметры накопления и смыва, использованные для моделирования непрерывного ряда

Тип землепользования	Максимально возможное накопление ЗВ, кг/га	Константа скорости накопления, 1/сут	Коэффициент смыва	Показатель степени смыва
Жилые	65	0,85	0,5	2
Коммерческие	80	0,85	0,6	2,2
Промышленные	101,5	0,85	0,7	2,2
Незастроенные	22,5	0,85	0,2	1,5

Для количественной оценки качества моделирования были использованы статистические метрики, аналогичные тем, что применялись в гидрологическом модуле, а именно: относительная погрешность средних концентраций ВВ (R_E) и коэффициент детерминации (R^2) (см. Раздел 6.1.2).

6.2.2. Оценка диффузного стока взвешенных веществ с территории бассейна р. Сетунь

В городских условиях процессы накопления и смыва ВВ происходят очень быстро и характеризуются сильной изменчивостью во времени, что связано с кратковременной, но интенсивной динамикой стока. Традиционные методы отбора проб, проводимые периодически и с низкой частотой, не способны зафиксировать пиковые концентрации и быстро меняющиеся колебания мутности, которые имеют решающее значение для оценки процессов смыва. Особенno важен факт, что основной объём ВВ смыывается именно в первые порции дождя. Данные логгеров позволили получить детальные временные ряды мутности, что существенно повысило точность моделирования и калибровки параметров модели SWMM (Рисунок 6.12).

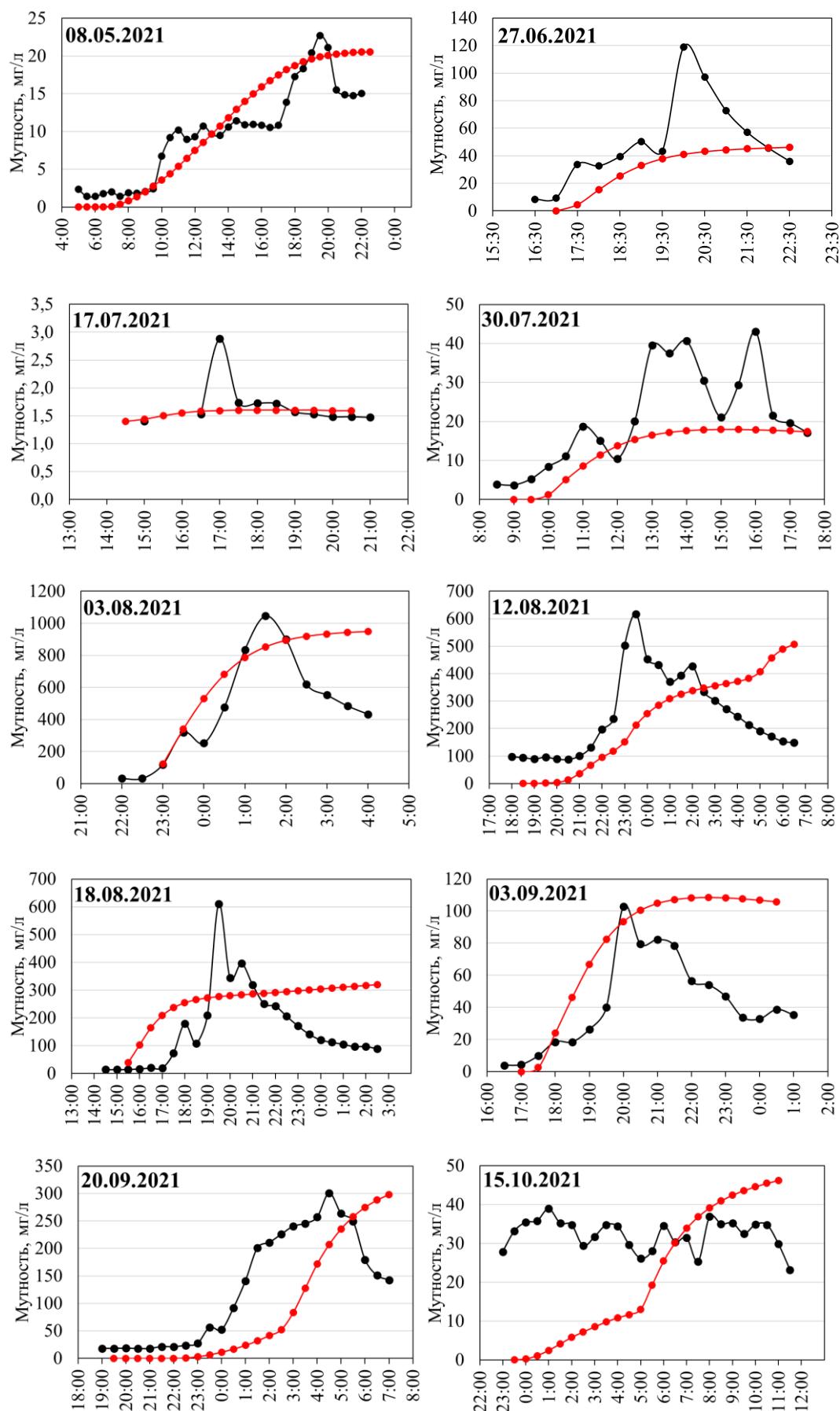


Рисунок 6.12. Измеренная (чёрная линия) и смоделированная (красная линия)
мутность воды в створе С5 р. Сетунь

В Таблице 6.7 представлен статистический анализ результатов моделирования. Наилучшие результаты моделирования были получены для паводка, прошедшего 8 мая 2021 г. Средняя смоделированная мутность (10,7 мг/л) близка к измеренной (9,8 мг/л), а параметры качества модели показали высокий уровень ($R_E = 9\%$, $R^2 = 0,8$). Слой стока за паводок составил 4 мм при бездождном периоде в 3,4 дня и слое осадков 34 мм. Паводки, прошедшие 27 июня и 20 сентября, имели также более длительный период между дождями – 11,8 и 8,9 дней соответственно – при этом модель показала удовлетворительные результаты. Можно сделать вывод о том, что при большем интервале времени между осадками модель способна адекватнее оценить накопление и последующий смыв ВВ.

Таблица 6.7

Результаты статистического анализа фактически измеренной и смоделированной концентрации ВВ (зелёный – модель считается хорошей, голубой – удовлетворительной, красный – неудовлетворительной)

№	Дата	$R_E, \%$	R^2
1	08.05.2021	9	0,80
2	27.06.2021	36	0,21
3	17.07.2021	8	0,01*
4	30.07.2021	38	0,41
5	03.08.2021	54	0,44
6	12.08.2021	5	0,05
7	18.08.2021	64	0,15*
8	03.09.2021	88	0,39
9	20.09.2021	30	0,23
10	15.10.2021	33	0,01*

* p -value > 0,05

При резких и интенсивных осадках, например 3 августа, модель значительно переоценила мутность – средняя смоделированная составила 722,9 мг/л против измеренной в 469,6 мг/л. При этом результаты статистического анализа показали погрешность 54% и коэффициент детерминации 0,44, что может указывать на ограниченность моделирования при прохождении ливня высокой интенсивности (максимальная интенсивность осадков достигала 3,7 мм/30 мин).

Для паводков, прошедших 27 июня, 30 июля, 3 августа и 20 сентября, модель показала неоднозначные результаты: SWMM недооценивает мутность при длительных бездождных периодах с малым слоем стока, при этом переоценивает её при кратковременных интенсивных осадках с большим значением слоя стока. Худшие результаты были получены для паводка, прошедшего 18 августа – относительная погрешность составила 64% при уровне значимости для коэффициента детерминации >0,05.

В некоторых случаях (например, 17 июля, 12 августа, 15 октября) относительная погрешность для смоделированных расходов была достаточно низкой (от 5 до 33%), однако коэффициент детерминации имел уровень значимости выше принятого ($p\text{-value} > 0,05$), что говорит о том, что модель даёт неплохие точечные предсказания, но при этом не объясняет статистически значимо вариацию данных. Это может быть по причине небольшого объёма выборки, слабой корреляции, либо если пиковые или вариационные особенности данных плохо уловлены, несмотря на хорошее среднее приближение. В данном случае можно говорить о том, что модель может быть применима только для прогноза средних значений ($R^2 = 0,94$ при средней относительной погрешности 37%) (**Рисунок 6.13**).

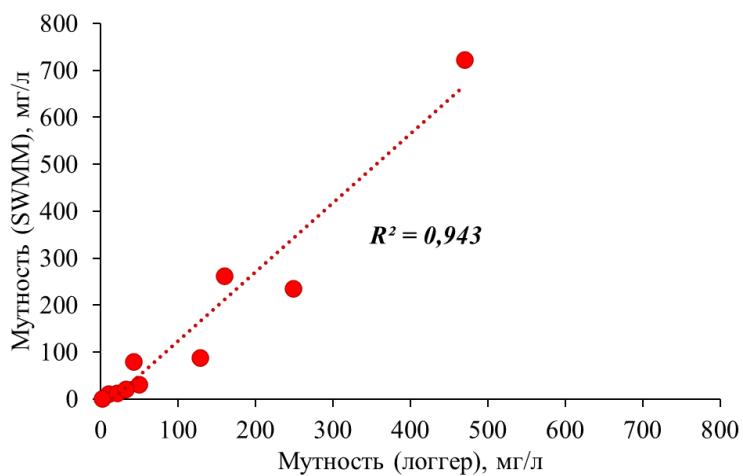


Рисунок 6.13. Зависимость между средней измеренной и смоделированной мутностью

Моделирование непрерывного ряда среднесуточных значений мутности с откалиброванными параметрами позволило сравнить данные с результатами пробоотбора, проводившегося в р. Сетунь в течение тёплого периода в 2021 г. (**Таблица 6.8, Рисунок 6.14**). Лишь в 2 случаях из 15 относительная погрешность не превышала 30%, в 3 случаях варьировалась в диапазоне 46–47%, а в остальных случаях превышала 60%, достигая максимальных значений вплоть до 682%. Причины таких результатов могут быть связаны с природой моделирования диффузного смыва и особенностями гидрологических условий в городе. Действительные механизмы накопления и смыва ЗВ крайне сложно однозначно описать: на их формирование влияют такие разнородные факторы, как действие ветра, движение транспорта, атмосфера, типы поверхностной активности, процессы эрозии, уборка улиц и множество других локальных и малопредсказуемых явлений [Rossman, Huber, 2016]. SWMM основана на эмпирической экспоненциальной функции накопления и смыва ВВ, которая хорошо работает для оценки средних и пиковых событий смыва, но менее точна при длительном непрерывном моделировании с изменчивой интенсивностью осадков и нестабильной динамикой мутности. Суточные концентрации мутности также сильно зависят от

локальной неоднородности источников их поступления, что достаточно сложно точно учесть в модели с фиксированными параметрами. Кроме того, суточное усреднение данных пробоотбора часто может не захватывать краткосрочные пиковые концентрации, тогда как модель дает динамические значения, что приводит к расхождениям.

Таблица 6.8

Результаты статистического анализа измеренной в результате пробоотбора и смоделированной суточной концентрации ВВ (зелёный – модель считается хорошей, голубой – удовлетворительной, красный – неудовлетворительной)

№	Дата	Мутность (пробоотбор), мг/л	SWMM, мг/л	RE, %
1	28.05.2021	21,1	106,8	406
2	23.06.2021	35,1	1,9	95
3	28.06.2021	522,9	429,1	18
4	29.06.2021	305,7	448,5	47
5	30.06.2021	157,0	380,3	142
6	01.07.2021	76,6	269,3	252
7	02.07.2021	50,1	273,2	445
8	03.07.2021	80,8	201,3	149
9	04.07.2021	60,8	130,9	115
10	05.07.2021	53,9	79,4	47
11	06.07.2021	48,1	46,7	3
12	23.07.2021	25,7	9,7	62
13	09.08.2021	33,7	49,3	46
14	06.09.2021	25,4	198,6	682
15	19.10.2021	16,3	28,8	77

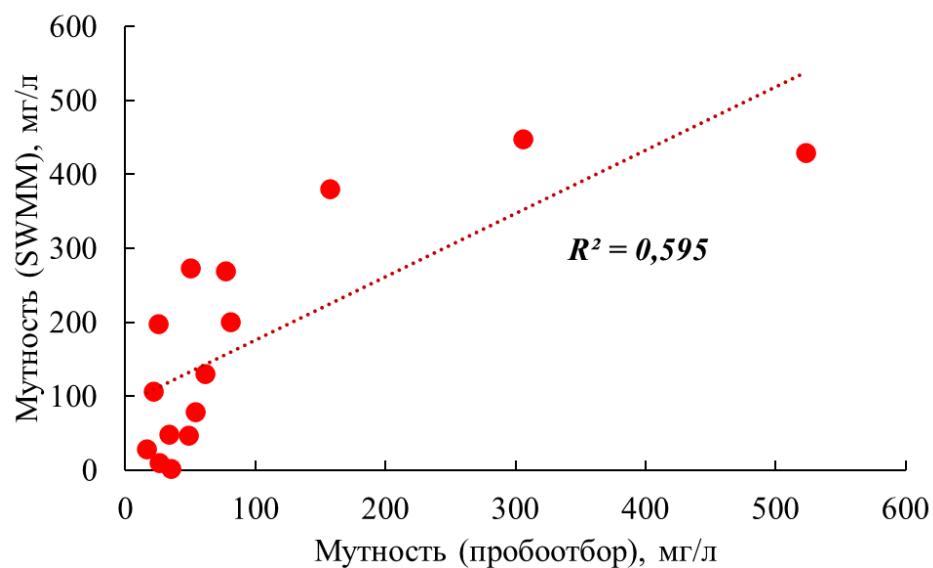


Рисунок 6.14. Зависимость между средней измеренной и суточной смоделированной мутностью

Если рассматривать непрерывный период, совмещённый с результатами логгера мутности, то можно заметить, что пики при моделировании слегка сдвинуты во времени, относительно записей логгера мутности (**Рисунок 6.15**). Помимо этого, в некоторые даты логгер не фиксировал повышение мутности, несмотря на наличие осадков (например, 4 сентября), тогда как модель давала её повышение до 300 мг/л.

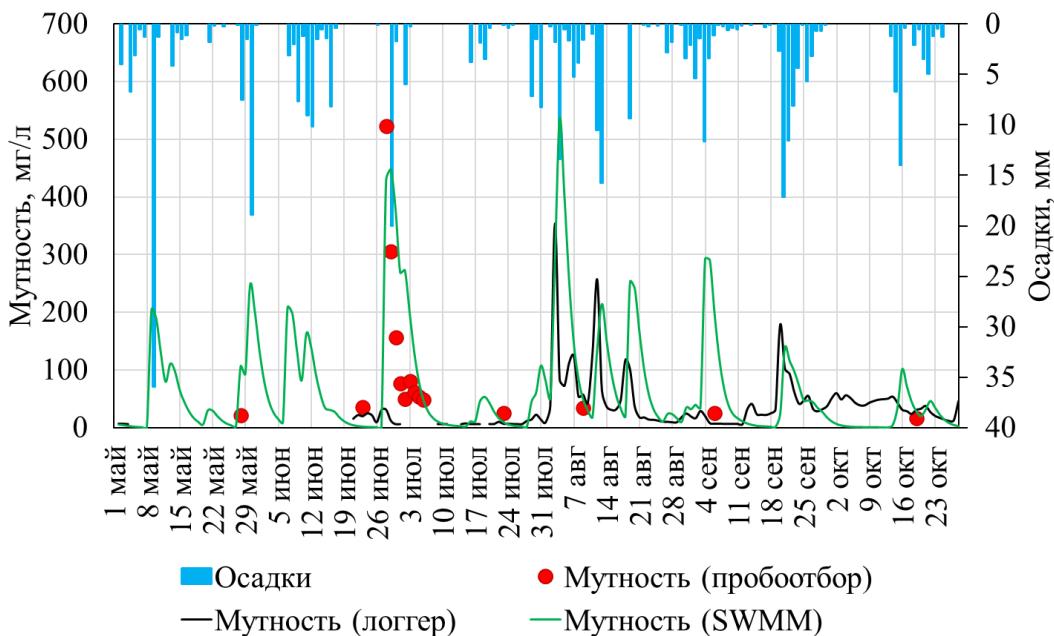


Рисунок 6.15. Совмещенный график суточной мутности, (1) записанной логгером, (2) полученной в результате пробоотбора, (3) смоделированной и (4) хода осадков

Процессы смыва ВВ в условиях малых городских водосборов, включая р. Сетунь, обладают сложной природой, что заметно затрудняет их моделирование. Как обсуждалось ранее в **Главе 5**, сток ВВ в городских условиях формируется под воздействием множества факторов – неоднородности поверхности, инфраструктурных особенностей, экзогенных процессов и т. д. При этом важно учитывать не только случаи выпадения осадков, но и специфические источники поступления ВВ, такие как сбросы сточных вод, вынос из канализационной системы, которые могут существенно повышать мутность воды независимо от дождевых событий. Кроме того, крупность наносов существенно влияет на процессы транспортировки и оседания частиц: мелкодисперсные фракции дольше остаются во взвешенном состоянии, а крупные быстро оседают, что не всегда однозначно учитывается в моделях. В совокупности перечисленные факторы вызывают высокую динамическую изменчивость концентраций ВВ, обуславливая быстрые и пиковые колебания мутности, которые сложно точно предсказать. Вследствие такой комплексности и взаимосвязанности процессов, моделирование смыва ВВ с высокой точностью практически невозможно, особенно при использовании эмпирических моделей с ограниченным набором параметров.

Оценка диффузного смыва в городах является весьма сложной задачей, так как на каждом из уровней процесс формирования стока неоднороден в пространстве и во времени. Применение математических моделей для количественных расчётов требует сбора довольно большого объёма информации, необходимой как для использования её в самих математических моделях, так и для их калибровки и верификации. Более того, неточечные источники требуют некоторой аппроксимации для применения в моделях качества воды [Михайлов, 2000]. По этим причинам проблема ошибок и погрешностей при моделировании диффузного смыва остаётся одной из ключевых в современных научных исследованиях. Значительные отклонения между расчётными и наблюдёнными значениями мутности часто обусловлены сложностью гидрологических процессов формирования стока в городской среде и неоднородностью метеорологических условий, а также ограничениями моделей, не полностью учитывающих пространственную и временную неоднородность процессов в условиях урбанизации.

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 подъёмами 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 участившимися 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 fazам 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.

Перечень сокращений

- АИС ГМВО – автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов
- АО – акционерное общество
- БКЛ – большая кольцевая линия
- ВВ – взвешенные вещества
- ГГИ – Государственный гидрологический институт
- ГПБУ – государственное природоохранное бюджетное учреждение
- ГУП – государственное унитарное предприятие
- ДМРЛ – доплеровский метеорологический радиолокатор
- ЖК – жилой комплекс
- ЗВ – загрязняющие вещества
- ИВП РАН – институт водных проблем Российской академии наук
- ИГ РАН – институт географии Российской академии наук
- ИО РАН – институт озероведения Российской академии наук
- МГУ – Московский государственный университет
- МГУП – Московское государственное унитарное предприятие
- МКАД – Московская кольцевая автомобильная дорога
- МО – метеорологическая обсерватория
- ООПТ – особо охраняемая природная территория
- СГОС – Сетуньские групповые очистные сооружения
- ТБО – твёрдые бытовые отходы
- УГМС – управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
- ФВР – фаза водного режима
- ЦГМС – центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
- ЦМР – цифровая модель рельефа
- ADCP – акустический доплеровский профилограф течений
- NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
- NTU – нефелометрические единицы измерения оптической мутности потока
- OSM – OpenStreetMap
- SWMM – Storm Water Management Model

Список литературы

1. Аксенов В.И., Мигалатий Е.В., Никифоров А.Ф. Переработка осадков сточных вод: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям 290800 Водоснабжение и водоотведение. — Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. — 84 с.
2. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. — М.: Изд-во Московского университета, 1998. — 202 с.
3. Аникеев А.В., Булдакова Е.В., Бурова В.Н., Еремина О.Н. и др. Геологический риск урбанизированных территорий. — М.: РУДН, 2020. — 316 с.
4. Анисимова Н.Г., Викторов А.С., Дзецкер Е.С., Зорина Е.Ф. и др. Природные опасности России. Том 3. Экзогенные геологические опасности / под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко. — М.: Крук, 2002. — 348 с.
5. Белозёрова Е.В., Чалов С.Р. Определение мутности речных вод оптическими методами // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2013. — Т. 6. — С. 39–45.
6. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение. — М.: ГЕОС, 2000. — 322 с.
7. Бобровицкая Н.Н., Зубкова К.М., Ткачева Л.Г. Водноэрозионные процессы на склонах и сток наносов рек в современных условиях // Труды VI Всероссийского гидрологического съезда. — Москва: Метеоагентство Росгидромета, 2008. — С. 228–233.
8. Болгов М.В., Арефьева Е.В. Оценка экстремальных гидрологических характеристик в условиях неопределенности климатических изменений // Технологии гражданской безопасности. — 2021. — Т. 18. — № 1(67). — С. 54–59.
9. Болгов М.В., Зайцева А.В., Завьялова Е.В. Оценка диффузного стока с территории г. Ростов на основе методов математического моделирования // Четвертые Виноградовские Чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. — 2020. — С. 41–47.
10. Болгов М.В., Коробкина Е.А. Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2013. — № 3. — С. 87–102.
11. Болгов М.В., Филиппова И.А., Харламов М.А. Современные изменения гидрологического режима и водообеспечение Московского региона // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 8. — С. 29–36.
12. Болгов М.В., Черногаева Г.М. Гидрологические проблемы Московского региона // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 8. — С. 5–8.

13. Брусова Н.Е., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Особенности режима осадков в Московском регионе в 2008-2017 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2019. — № 1. — С. 127–172.
14. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 448 с.
15. Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 360 с.
16. Герасимов И.П., Преображенский В.С. Основы конструктивной географии. — 1986. — 287 с.
17. Гидрологические изыскания для объекта «Комплексная экологическая реабилитация р. Сетунь на участках от МКАД до ул. Дорогобужская, от ул. Дорогобужская до ул. Рябиновая с прилегающей территорией в границах природного заказника «Долина реки Сетунь»: технический отчёт/Самохин М.А., Чалов С.Р. — Москва: ООО «ЭЛГИС», 2009. — 86 с.
18. Глушков В.Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований. — М.: АН СССР, 1961. — 416 с.
19. Глушкова В.Г. Московская агломерация // Москва : Энциклопедия / под ред. С.О. Шмидта. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1997. — С. 976.
20. Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2021. — № 4. — С. 6–28.
21. Данилов-Данильян В.И. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения. — М.: РАН, 2020. — 512 с.
22. Данилов-Данильян В.И., Джамалов Р.Г., Васильева В.П., Егоров Ф.Б. Водные проблемы Московской агломерации: состояние ресурсов подземных и поверхностных вод // Нерешенные экологические проблемы Москвы и Подмосковья. — 2012. — С. 115–125.
23. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. — Казань: Изд-во Казанского университета, 1984. — 264 с.
24. 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.
25. Денисова И.С., Лошков О.Д., Самохин М.А., Чалов С.Р. Формирование водного стока малой городской реки Сетуни (Москва). — 2025. — Т. 80. — № 1. — С. 134–144.
26. Дмитриев А.А., Бессонов Н.П. Климат Москвы. Особенности климата большого города. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 320 с.

27. Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В., Алексеева А.А., Васильев Е.В. Опыт тестирования экспериментальных методов Гидрометцентра России при составлении штормовых предупреждений о неблагоприятных и опасных явлениях погоды // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2023. — Т. 4. — № 390. — С. 46.
28. Долгов С.В. Диффузный вынос биогенов с территории Нижнего Новгорода // Экология урбанизированных территорий. — 2018. — Т. 3. — С. 75–82.
29. Ерина О.Н., Терешина М.А., Шинкарева Г.Л., Чалов С.Р. и др. Фракционный и химический состав взвешенных наносов городской реки Сетунь и его продольная трансформация // Проблемы экоинформатики. — 2022. — С. 166–169.
30. Ефимов В.А. Пространственно-временная изменчивость химического состава наносов рек российской Арктики: дис. ...канд. геогр. наук: 1.6.16/Ефимов Василий Антонович — М., 2023. — 135 с.
31. Зорина Е.Ф., Ковалев С.Н., Прокопьев В.П., Рулева С.Н. и др. Оценка опасности овражной эрозии и русловых процессов на урбанизированных территориях и методы их прогнозирования // Эрозионные и русловые процессы. — 2020. — № 7. — С. 112–144.
32. Зорина Е.Ф., Ковалев С.Н., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Опасности проявления процессов, обусловленных поверхностными водами, на урбанизированных территориях // Эрозия почв и русловые процессы. — 2010. — Т. 17. — С. 71–94.
33. Илларионова О.А., Климанова О.А. Использование ландшафтного подхода в исследованиях зеленой инфраструктуры приречных территорий в крупнейших городах // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения: материалы XIV Международной ландшафтной конференции. — Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. — С. 95–97.
34. Карапашев А.В. Сток наносов его изучение и географическое распределение. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 240 с.
35. Киреева М.Б., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Фролова Н.Л. Изучение современного водного режима рек европейской территории России с помощью автоматизированного алгоритма расчленения гидрографа GrWat // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения : Сборник научных трудов. — Нижний Новгород: Студия Ф1, 2019. — С. 160–165.
36. Кислов А.В. Климат Москвы в условиях глобального потепления. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017. — 288 с.
37. Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И. «Остров тепла» московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2017. — Т. 4. — С. 12–19.

38. Китаев Л.М. Гидрологические особенности городских территорий: дис. ...канд. геогр. наук: 25.00.27/Китаев Лев Михайлович — М., 2001. — 125 с.
39. Ковалев С.Н., Ефремова Т.С., Михайлова Н.М. Овраги и овражная эрозия на территории Москвы // Эрозия почв и русловые процессы : Труды Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ. — 2015. — Т. 19. — С. 112–132.
40. Ковалёв С.Н., Чалов Р.С. Типы взаимосвязи инфраструктуры населенных пунктов с эрозионно-русловыми системами // Геоморфология и палеогеография. — 2021. — Т. 52. — № 2. — С. 52–62.
41. Кокорев А.В. Программа выполнения расчетов по данным промеров и геодезической съемки морфопрофилей русла реки и затопляемой части речной долины; «Profiles2012M»; Руководство пользователя. — Валдай: Валдайский филиал ФГБУ «ГГИ», 2012. — С. 31.
42. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоём. — Санкт-Петербург: ООО «Нестор-История», 2019. — 248 с.
43. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В. и др. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России // Вестник Российской академии наук. — 2019. — Т. 89. — № 6. — С. 603–614.
44. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В. и др. Гидрология антропогенного направления: становление, методы, результаты // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2017. — Т. 2. — С. 8–23.
45. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С., Мельник К.С. Оценка влияния урбанизации на годовой сток и качество вод в мире и на континентах // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2022. — Т. 86. — № 3. — С. 470–480.
46. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Мельник К.С. Влияние урбанизированных территорий на мировой речной сток // Известия Русского географического общества. — 2020. — Т. 152. — № 5. — С. 59–68.
47. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Антропогенные воздействия на сток реки Москвы. — Москва: ООО «МАКС Пресс», 2015b. — 168 с.
48. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Влияние ландшаftов Берлина, Лондона, Москвы, Парижа на речной сток // Геология, география и глобальная энергия. — 2017. — Т. 1. — С. 51–59.
49. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Влияние урбанизированных территорий на речной сток в Европе // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2019. — № 3. — С. 78–87.

50. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Гидрологические изменения в бассейне реки Москвы // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.» — 2015а. — С. 161–167.
51. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Роль Московской агломерации в изменении стока реки Москвы // Экология урбанизированных территорий. — 2018. — Т. 3. — С. 40–44.
52. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Трансформация стока под влиянием ландшафтных изменений в бассейне реки Москвы и на территории города Москвы // Водные ресурсы. — 2015с. — Т. 42. — № 2. — С. 133.
53. Крюков В.А., Голубева Е.И. Оценка изменений природоохранных режимов городской ООПТ в ГИС-среде // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий. — 2021. — Т. 27. — № 3. — С. 323–334.
54. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. — М.: Издательство МГУ, 1960. — 343 с.
55. Куприянов В.В. Гидрологические аспекты урбанизации. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 183 с.
56. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. — М.: Изд-во МГУ, 1993. — 200 с.
57. Лебедева Е.В., Михалёв Д.В. Эколо-геоморфологические последствия техногенного воздействия на малые реки юго-запада Москвы // Геоморфология. — 2011. — Т. 4. — С. 22–32.
58. Локощенко М.А. Изменения климата Москвы в современную эпоху // МЕТЕОСПЕКТР. — 2017. — Т. 3. — С. 171–174.
59. Локощенко М.А. Климат Москвы и его современные изменения // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии : материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 50-летию кафедры общего землеведения и гидрометеорологии Белорусского государственного университета. — Минск: БГУ, 2023. — С. 73–79.
60. Лошаков А.И., Верховцева Н.В., Ларина Г.Е. Экологическая оценка функциональных зон природного заказника «Долина реки Сетунь» по отклику микробного комплекса почвы // Региональные геосистемы. — 2018. — Т. 42. — № 2. — С. 246–257.
61. Львович М.И. Человек и воды. — М.: Географгиз, 1963. — 568 с.
62. Львович М.И., Черногаева Г.М. Изменение водного баланса территории под влиянием урбанизации // Проблемы гидрологии. М.: Известия АН СССР. — 1978. — С. 43–52.
63. Львович М.И., Чернышев Е.П. Закономерности водного баланса и вещественного обмена в условиях города // Известия АН СССР. Серия географическая. — 1983. — № 3. — С. 23–29.

64. Макаревич А.А., Яротов А.Е. Речной сток и русловые процессы: пособие. — Минск: БГУ, 2019. — 115 с.
65. Михайлов С.А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. — 2000. — № 56. — С. 130.
66. Михайлова Н.М., Овчинникова О.В. Данные радиолокационных измерений осадков: доступность, качество, применимость в гидрологической практике // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Цифровая география». — Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2024. — С. 214–217.
67. Москва: Геология и город / под ред. В.И. Осипова, О.П. Медведева. — М.: АО «Московские учебники и Картолитография», 1997. — 400 с.
68. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Гидрологические наблюдения на постах. Вып. 6, I. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 384 с.
69. Никольская И.И., Прохорова С.Д. Тенденции развития овражной эрозии на территории Москвы // Двадцать шестое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. — Арзамас: Арзамасский государственный педагогический университет им. А.П. Гайдара, 2011. — С. 176–177.
70. Озерова Н.А. Москва-река в пространстве и времени. — М.: Прогресс-Традиция, 2014. — 320 с.
71. Орлов Б.В., Бойкова И.Г., Волшаник В.В. Управление стоком с территории мегаполиса. — М.: Московский государственный строительный университет, 2014. — 330 с.
72. Поздняков Ш.Р., Шагидуллин Р.Р., Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю. и др. Инвентаризация источников внешней антропогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. — 2020. — № 4. — С. 125.
73. Полянин В.О., Фащевская Т.Б., Словягина А.Н. Особенности формирования и регулирования диффузного загрязнения в пределах городских территорий (на примере р. Язы) // Водные ресурсы. — 2023. — Т. 50. — № 1. — С. 53–67.
74. Промахова Е.В., Чалов С.Р. Современные технологии определения мутности воды // Маккавеевские чтения-2014. — М.: Географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 2015. — С. 82–95.
75. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 10. Верхне-Волжский район / под ред. Ю.Е. Яблокова. — М.: Гидрометеоиздат, 1973. — 478 с.

76. Рец Е.П., Киреева М.Б., Самсонов Т.Е., Езерова Н.Н. и др. Алгоритм автоматизированного расчленения гидрографа по методу БИ Куделина GrWat: проблемы и перспективы // Водные ресурсы. — 2022. — Т. 49. — № 1. — С. 27–42.
77. Ромзайкина О.Н., Бубушян А.А., Щукин И.С., Васенев В.И. Оценка эффекта применения природоподобных решений в управлении ливневыми водами на примере бывшей промышленной зоны в г. Москве // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. — 2024. — Т. 19. — № 2. — С. 281–301.
78. Соколов Д.И., Чалов С.С., Терешина М.А., Ерина О.Н. и др. Особенности гидрологического режима урбанизированной реки Сетунь // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. — Т. 834. — С. 180–185.
79. Сорокина Е.А., Локощенко М.А. Поверхностный «остров тепла» в Москве по данным спутников // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия «Естественные и инженерные науки». — 2021. — Т. 1. — № 37. — С. 32–38.
80. Стулов Е.А. Влияние города Москвы на усиление летних осадков // Метеорология и гидрология. — 1993. — № 11. — С. 34–41.
81. Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И., Шинкарева Г.Л. и др. Продольная трансформация загрязненности воды р. Сетуни // VIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов». — Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. — С. 369–373.
82. Терский П.Н., Фатхи М.О., Ракчеева Е.А., Якимова А.И. и др. Гидрологическое обоснование системы мониторинга зон затопления в Московском регионе // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 8. — С. 37–48.
83. Терский П.Н., Фатхи М.О., Цыпленков А.С., Землянов И.В. и др. Определение границ зон затопления рек города Москвы // Геориск. — 2017. — № 3. — С. 20–29.
84. Терский П.Н., Цыпленков А.С., Морейдо В.М., Самохин М.А. и др. Восстановление рядов стока воды малоизученной городской реки Сетунь (г. Москва) на основе данных натурных наблюдений и гидрологического моделирования // Инженерная экология - 2023 : материалы международного симпозиума. — М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2023. — С. 142–146.
85. Устюжанин Б.С. Реакция речного стока на урбанизацию водосбора // Расчеты и прогнозы гидрологических характеристик / Труды ЛГМИ. — 1989. — № 103. — С. 73–81.

86. Фащевская Т.Б., Словягина А.Н., Полянин В.О., Алгушаева А.В. Антропогенные изменения гидрохимического режима и качества воды городского водотока (на примере реки Лихоборки, Московский регион) // Водные ресурсы. — 2023. — Т. 50. — № 2. — С. 203–217.
87. Фролова Н.Л. Гидрология рек. Антропогенные изменения речного стока. — М.: Юрайт, 2018. — 115 с.
88. Цыпленков А.С., Черникова О.В., Кошелева Н.Е., Чалов С.Р. ГИС-моделирование баланса наносов и загрязняющих веществ в бассейне р. Сетунь (Москва) // Инженерная экология - 2021 : Доклады международного симпозиума. — М., 2021. — С. 172–176.
89. Чалов С.Р., Платонов В.С., Морейдо В.М., Самохин М.А. и др. Реакция водного стока малой городской реки на экстремальные дождевые осадки на территории Москвы в 2020 и 2021 гг. // Метеорология и гидрология. — 2023а. — № 2. — С. 69–79.
90. Чалов С.Р., Ефимов В.А. Гранулометрический состав взвешенных наносов: характеристики, классификации, пространственная изменчивость // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2021. — Т. 4. — С. 91–103.
91. Чалов С.Р., Лошков О.Д., Крастынь Е.А. Причины и закономерности быстрых изменений состава взвесей в малой городской реке Сетунь // Известия РАН. Серия географическая. — 2024. — Т. 88. — № 6. — С. 893–901.
92. Чалов С.Р., Морейдо В.М., Денисова И.С., Солоников И.А. Высокочастотный мониторинг и модели машинного обучения для оценки синоптической изменчивости стока взвешенных наносов малой городской реки // Гидросфера. Опасные процессы и явления. — 2023б. — Т. 1. — № 5. — С. 59–74.
93. Чалов С.Р., Самохин М.А. Развитие русла малой равнинной реки Сетунь в черте Москвы // Конференция «Эрозионные и русловые процессы на реках равнинных территорий». — Минск, 2009. — С. 183–185.
94. Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Тебенкова Н.А., Козачек А.В. и др. Двухкомпонентное расчленение гидрографа реки Протвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2021. — № 6. — С. 62–76.
95. Чубарова Н.Е., Незваль Е.И., Беликов И.Б., Горбаренко Е.В. и др. Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ // Метеорология и гидрология. — 2014. — Т. 9. — С. 49–64.
96. Шамов В.В., Юрченко С.Г., Болдескул А.Г., Луценко Т.Н. и др. Гидролого-гидрохимическая характеристика малых рек города Владивосток // Тихоокеанская география. — 2025. — № 1(21). — С. 33–47.

97. Янин Е.П. Общие условия и основные факторы формирования водного стока в городских ландшафтах // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. — 2006. — № 9. — С. 73–111.
98. Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Платонов В.С., Степаненко В.М. и др. Влияние московского мегаполиса на осадки теплого периода в зависимости от крупномасштабных атмосферных условий // Водные ресурсы. — 2023. — Т. 50. — № 5. — С. 550–560.
99. Ясинский Н.С. Закономерности формирования стока фосфора в верхней части бассейна реки Москвы: дис. ...канд. геогр. наук: 25.00.27/ 97. Ясинский Николай Сергеевич — М., 2019. — 174 с.
100. Ясинский С.В., Алиева М.Б., Шмакова М.В. Формирование стока малых рек в крупном городе бассейна Волги (на примере Нижнего Новгорода) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2023. — № 1. — С. 5–19.
101. Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В. Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблемы оценки // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2023. — Т. 87. — № 1. — С. 115–130.
102. Akan A.O., Houghtalen R.J. Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modeling. — John Wiley & Sons, 2003.
103. Arnold C.L., Gibbons C.J. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a key environmental indicator // Journal of the American Planning Association. — 1996. — Vol. 62. — № 2. — P. 243–258.
104. Bach P.M., McCarthy D.T., Deletic A. Redefining the stormwater first flush phenomenon // Water Research. — 2010. — Vol. 44. — № 8. — P. 2487–2498.
105. Barałkiewicz D., Chudzińska M., Szpakowska B., Świerk D. et al. Storm water contamination and its effect on the quality of urban surface waters // Environmental Monitoring and Assessment. — 2014. — Vol. 186. — № 10. — P. 6789–6803.
106. Bengtsson L., Westerström G. Urban snowmelt and runoff in northern Sweden // Hydrological Sciences Journal. — 1992. — Vol. 37. — № 3. — P. 263–275.
107. Carter J., Owens P.N., Walling D.E., Leeks G.J.L. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system // Science of The Total Environment. — 2003. — Vols. 314–316. — P. 513–534.
108. Chalov S.R., Platonov V.S., Erina O.N., Moreido V.M. et al. Rainstorms impacts on water, sediment, and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021 // Theoretical and Applied Climatology. — 2023. — Vol. 151. — № 1. — P. 871–889.

109. Chen H., Huang J.J., Dash S.S., McBean E. et al. Assessing the impact of urbanization on urban evapotranspiration and its components using a novel four-source energy balance model // Agricultural and Forest Meteorology. — 2022. — Vol. 316. — P. 108853.
110. Cheng L., Xu Z., Wang D., Cai X. Assessing interannual variability of evapotranspiration at the catchment scale using satellite-based evapotranspiration data sets // Water Resources Research. — 2011. — Vol. 47. — № 9.
111. Chiacchiera A., Sai F., Salvetti A., Guariso G. Neural Structures to Predict River Stages in Heavily Urbanized Catchments // Water (Switzerland). — 2022. — Vol. 14. — № 15.
112. Chow M.F., Yusop Z., Toriman M.E. Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using Storm Water Management Model // International Journal of Environmental Science and Technology. — 2012. — Vol. 9. — № 4.
113. Chubarova N.E., Vogel H., Androsova E.E., Kirsanov A.A. et al. Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2022. — Vol. 22. — № 16.
114. Chubarova N.E., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Vogel B. et al. Aerosol and its radiative effects during the aeroradcity 2018 Moscow experiment // Geography, Environment, Sustainability. — 2019. — Vol. 12. — № 4.
115. Crobeddu E., Allali S., Bennis S. Washoff model of total suspended particles in urban areas // WIT Transactions on Ecology and the Environment. — 2008. — Vol. 111.
116. Devereux O.H., Prestegaard K.L., Needelman B.A., Gellis A.C. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland // Hydrological Processes. — 2010. — Vol. 24. — № 11.
117. Douglas I. The impact of land-use changes, especially logging, shifting cultivation, mining and urbanization on sediment yields in humid tropical Southeast Asia: A review with special reference to Borneo // IAHS-AISH Publication. — 1996. — Vol. 236.
118. Droujko J., Molnar P. Open-source, low-cost, in-situ turbidity sensor for river network monitoring // Scientific Reports. — 2022. — Vol. 12. — № 1.
119. Eimers M.C., McDonald E.C. Hydrologic changes resulting from urban cover in seasonally snow-covered catchments // Hydrological Processes. — 2015. — Vol. 29. — № 6.
120. Etikala B., Madhav S., Somagouni S.G. Urban water systems: An overview. — 2022.
121. Fan C.-Y., Field R., Lai F. Sewer-Sediment Control: Overview of an Environmental Protection Agency Wet-Weather Flow Research Program // Journal of Hydraulic Engineering. — 2003. — Vol. 129. — № 4.
122. Fletcher T.D., Andrieu H., Hamel P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art // Advances in Water Resources. — 2013. — Vol. 51. — P. 261–279.

123. Foster S.S.D. Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas // IAHS-AISH Publication. — 1990. — № 198.
124. Gao Y.Y., Sun Q.Y., Wen A.X., Cheng Y.P. Effectiveness of groundwater extraction in Beijing since the inauguration of the first phase of the South-to-North Water Diversion Project, China // Journal of Groundwater Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — № 3. — P. 294–307.
125. Gao Z., Zhang Q., Li J., Wang Y. et al. First flush stormwater pollution in urban catchments: A review of its characterization and quantification towards optimization of control measures // Journal of Environmental Management. — 2023. — Vol. 340. — P. 117976.
126. Garcia-Fresca B., Sharp J.M. Hydrogeologic considerations of urban development: Urban-induced recharge // Humans as Geologic Agents. — 2005. — Vol. 16. — P. 123–136.
127. Gerasimova M.I., Chernitsova O.V., Vasil'chuk J.Y., Kosheleva N.E. GIS mapping of the soil cover of an urbanized territory: drainage basin of the Setun river in the west of Moscow (Russian Federation) // Geography, Environment, Sustainability. — 2024. — Vol. 17. — № 2. — P. 131–138.
128. Grimmond C.S.B., Oke T.R. An evapotranspiration-interception model for urban areas // Water Resources Research. — 1991. — Vol. 27. — № 7. — P. 1739–1755.
129. Groundwater in the Southern Member States of the European Union: an assessment of current knowledge and future prospects. Country report for France. — Germany, 2010. — 46 p.
130. Gurnell A., Lee M., Souch C. Urban rivers: hydrology, geomorphology, ecology and opportunities for change // Geography Compass. — 2007. — Vol. 1. — № 5. — P. 1118–1137.
131. Ha Q.-K., Koontanakulvong S. Understanding impacts of groundwater extraction on flow dynamics in multi-aquifers in the Ho Chi Minh City Area, Vietnam // Journal of Water Management Modeling. — 2024. — Vol. 32.
132. Habineza V., Ndokoye P. Effects of rapid urbanization on the hydrological process of Nyabarongo River in Rwanda // Journal of Agriculture. — 2025. — Vol. 9. — № 1. — P. 7–22.
133. Hamilton B., Coops N.C., Lokman K. Time series monitoring of impervious surfaces and runoff impacts in Metro Vancouver // Science of The Total Environment. — 2021. — Vol. 760. — P. 143873.
134. Hollis G.E. The Hydrological Effects of Urbanisation in the Canon's Brook Catchment, Harlow New Town, Essex. // Doctoral thesis, University of London. — 1974. — 355 p.
135. Hollis G.E. The effect of urbanization on floods of different recurrence interval // Water Resources Research. — 1975. — Vol. 11. — № 3. — P. 431–435.
136. Horton R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity // Proceeding Soil Science of America. — 1940. — Vol. 5. — P. 399–417.
137. Huff F.A., Changnon S.A. Climatological assessment of urban effects on precipitation at St. Louis // Journal of Applied Meteorology. — 1972. — Vol. 11. — № 5. — P. 823–842.

138. Itsukushima R., Ohtsuki K. A century of stream burial due to urbanization in the Tokyo Metropolitan Area // Environmental Earth Sciences. — 2021. — Vol. 80. — № 7. — 237 p.
139. Järvi L., Grimmond C.S.B., McFadden J.P., Christen A. et al. Warming effects on the urban hydrology in cold climate regions // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7. — № 1. — P. 5833.
140. Jens S.W., McPherson M.B. Hydrology of urban areas // Handbook of Applied Hydrology / ed. Chow V.T. — New York: Mc-Graw Hill Book Co. — 1964. — 45 p.
141. Johnson M.G., Owen G.E. Nutrients and nutrient budgets in the Bay of Quinte, Lake Ontario // Journal of the Water Pollution Control Federation. — 1971. — Vol. 43. — № 5. — P. 836–853.
142. Jones D.E. Where is Urban Hydrology Practice Today? // Journal of the Hydraulics Division. — 1971. — Vol. 97. — № 2. — P. 257–264.
143. Kabul's Water Crisis: An Inflection Point for Action. — 2025. — 20 p.
144. Kasimov N.E., Chalov S.R., Chubarova N.E., Kosheleva N.E. et al. Urban heat and pollution island in the Moscow megacity: Urban environmental compartments and their interactions // Urban Climate. — 2024. — Vol. 55. — P. 101972.
145. Kokkonen T.V., Grimmond C.S.B., Christen A., Oke T.R. et al. Changes to the Water Balance Over a Century of Urban Development in Two Neighborhoods: Vancouver, Canada // Water Resources Research. — 2018. — Vol. 54. — № 9. — P. 6625–6642.
146. Kong D., McVicar T.R., Xiao M., Zhang Y. et al. phenofit: An R package for extracting vegetation phenology from time series remote sensing // Methods in Ecology and Evolution. — 2022. — Vol. 13. — № 7. — P. 1508–1527.
147. Lawler D.M., Petts G.E., Foster I.D.L., Harper S. Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: The Upper Tame, West Midlands, UK // Science of the Total Environment. — 2006. — Vol. 360. — № 1–3. — P. 109–126.
148. Lazaro T.R. Urban hydrology. A multidisciplinary perspective // Ann Arbor Science Publishers. — 1979. — 249 p.
149. Lerner D.N. Identifying and quantifying urban recharge: A review // Hydrogeology Journal. — 2002. — Vol. 10. — № 1. — P. 143–152.
150. Li C., Liu M., Hu Y., Gong J. et al. Modeling the quality and quantity of runoff in a highly urbanized catchment using storm water management model // Polish Journal of Environmental Studies. — 2016. — Vol. 25. — № 4. — P. 1573–1581.
151. Li H., Meier F., Lee X., Chakraborty T., Liu J. et al. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin // Science of the Total Environment. — 2018. — Vol. 636. — P. 818–828.

152. Liquete C., Canals M., Ludwig W., Arnau P. Sediment discharge of the rivers of Catalonia, NE Spain, and the influence of human impacts // *Journal of Hydrology*. — 2009. — Vol. 366. — № 1–4. — P. 76–88.
153. Liu C., Yu J., Kendy E. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain // *Water International*. — 2001. — Vol. 26. — № 2. — P. 265–272.
154. Liu J., Sample D.J., Bell C., Guan Y. Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater // *Water (Switzerland)*. — 2014. — Vol. 6. — № 4. — P. 1069–1099.
155. Lokoshchenko M.A. Urban ‘heat island’ in Moscow // *Urban Climate*. — 2014. — Vol. 10. — № P3. — P. 550–562.
156. Lokoshchenko M.A., Alekseeva L.I. Influence of meteorological parameters on the urban heat island in Moscow // *Atmosphere*. — 2023. — Vol. 14. — № 3. — P. 507.
157. MacKenzie K.M., Singh K., Binns A.D., Whiteley H.R. et al. Effects of urbanization on stream flow, sediment, and phosphorous regime // *Journal of Hydrology*. — 2022. — Vol. 612. — P. 128283.
158. McGrane S.J. Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review // *Hydrological Sciences Journal*. — 2016. — Vol. 61. — № 13. — P. 2295–2311.
159. McPherson M.B. Hydrological effects of urbanization: report of the sub group on the effects of urbanization on the hydrological environment, of the Coordinating Council of the International Hydrological Decade // THE UNESCO PRESS. — 1974. — 280 p.
160. Miller J.D., Hutchins M. The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. — 2017. — Vol. 12. — P. 345–362.
161. Moglen G.E., Nelson K.C., Palmer M.A., Pizzuto J.E. et al. Hydro-ecologic responses to land use in small urbanizing watersheds within the Chesapeake bay watershed // *Geophysical Monograph Series*. — 2004. — Vol. 153. — P. 41–60.
162. O'Driscoll M., Clinton S., Jefferson A., Manda A. et al. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States // *Water (Switzerland)*. — 2010. — Vol. 2. — № 3. — P. 605–648.
163. Olivera F., DeFee B.B. Urbanization and its effect on runoff in the Whiteoak Bayou watershed, Texas // *Journal of the American Water Resources Association*. — 2007. — Vol. 43. — № 1. — P. 170–182.
164. Ouyang Z., Sciusco P., Jiao T., Feron S. et al. Albedo changes caused by future urbanization contribute to global warming // *Nature Communications*. — 2022. — Vol. 13. — № 1. — P. 3800.

165. Palma Nava A., Parker T.K., Carmona Paredes R.B. Challenges and experiences of managed aquifer recharge in the Mexico City metropolitan area // *Groundwater*. — 2022. — Vol. 60. — № 5. — P. 675–684.
166. Pang X., Gu Y., Launiainen S., Guan M. Urban hydrological responses to climate change and urbanization in cold climates // *Science of The Total Environment*. — 2022. — Vol. 817. — P. 153066.
167. Parveen A., Ahmad S.N. Urban water system of the National Capital Territory (NCT) of Delhi: A comprehensive study // *Water Supply*. — 2024. — Vol. 24. — № 11. — P. 3639–3651.
168. Pohle I., Zeilfelder S., Birner J., Creutzfeldt B. The 2018–2023 drought in Berlin: impacts and analysis of the perspective of water resources management // *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*. — 2024. — P. 1–28.
169. Praskiewicz S., Chang H. Impacts of climate change and urban development on water resources in the Tualatin River Basin, Oregon // *Annals of the Association of American Geographers*. — 2011. — Vol. 101. — № 2. — P. 249–271.
170. Rhugwasanye C., Agarwal S., Chappidi H.R., Kottapalli R.L. Bujumbura urban flood simulation based on SWMM model // *AIP Conference Proceedings*. — 2023. — Vol. 2707. — № 1. — P. 040013.
171. Rodriguez F., Andrieu H., Morena F. A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies // *Journal of Hydrology*. — 2008. — Vol. 351. — № 3–4. — P. 268–287.
172. Rossman L., Simon M. Storm water management model user's manual version 5.2. // U.S. Environmental Protection Agency. — 2022. — 424 p.
173. Rossman L.A., Huber W.C. Storm water management model reference manual. Volume I Hydrology (Revised) // U.S. Environmental Protection Agency. — 2016. — 231 p.
174. Russell K., Vietz G., Fletcher T.D. Not just a flow problem: how does urbanization impact on the sediment regime of streams? // *Proceedings of the 8th Australian Stream Management Conference*. — 2016. — P. 661–667.
175. Salvadore E., Bronders J., Batelaan O. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions // *Journal of Hydrology*. — 2015. — Vol. 529. — P. 62–81.
176. Sartor J.D., Boyd G.B., Agardy F.J. Water pollution aspects of street surface contaminants // *Journal of the Water Pollution Control Federation*. — 1974. — Vol. 46. — № 3. — P. 458–467.
177. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures // *Analytical Chemistry*. — 1964. — Vol. 36. — № 8. — P. 1627–1639.

178. Schliemann S.A., Grevstad N., Brazeau R.H. Water quality and spatio-temporal hot spots in an effluent-dominated urban river // *Hydrological Processes*. — 2021. — Vol. 35. — № 1. — P. e14001.
179. Shepherd J.M., Burian S.J. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city // *Earth Interactions*. — 2003. — Vol. 7. — № 4. — P. 1–17.
180. Shepherd J.M., Pierce H., Negri A.J. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite // *Journal of Applied Meteorology*. — 2002. — Vol. 41. — № 7. — P. 689–701.
181. Shevchenko A.V., Seleznev A.A., Malinovsky G.P., Yarmoshenko I.V. Modeling sediment production in urban environments: case of Russian cities // *Geography, Environment, Sustainability*. — 2023. — Vol. 16. — № 4. — P. 144–155.
182. Skougaard Kaspersen P., Høegh Ravn N., Arnbjerg-Nielsen K., Madsen H. et al. Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding // *Hydrology and Earth System Sciences*. — 2017. — Vol. 21. — № 8. — P. 4131–4147.
183. Taha H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat // *Energy and Buildings*. — 1997. — Vol. 25. — № 2. — P. 99–103.
184. Todd-Burley N., Halwyn A., Wem C., Ing R. et al. Understanding river channel sensitivity to geomorphological changes. Literature review and understanding factors that influence river channel change // *Environment Agency*. — 2021. — 120 p.
185. Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia // *Atmosphere*. — 2018. — Vol. 9. — № 2. — P. 50.
186. Varentsov M.I., Grishchenko M.Y., Wouters H. Simultaneous assessment of the summer urban heat island in moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // *Geography, Environment, Sustainability*. — 2019. — Vol. 12. — № 4. — P. 74–95.
187. Weibel S.R., Anderson R.J., Woodward R.L. Urban land runoff as a factor in stream pollution // *Water Pollution Control Federation*. — 1964. — Vol. 36. — № 7. — P. 914–924.
188. Welty C., Miller A.J., Belt K.T., Smith J.A. et al. Design of an environmental field observatory for quantifying the urban water budget // *Cities of the Future towards Integrated Sustainable Water and Landscape*. — 2007. — P. 72–88.
189. Whipple W., Hunter J. V., Yu S.L. Unrecorded pollution from urban runoff // *Journal of the Water Pollution Control Federation*. — 1974. — Vol. 46. — № 5. — P. 873–885.

190. White M.D., Greer K.A. The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Peñasquitos Creek, California // Landscape and Urban Planning. — 2006. — Vol. 74. — № 2. — P. 125–138.
191. Xiao Y., Luan B., Zhang T., Liang D. et al. Experimental study of sediment wash-off process over urban road and its dependence on particle size distribution // Water Science and Technology. — 2022. — Vol. 86. — № 10. — P. 2732–2748.
192. Yan H., Zhu D.Z., Loewen M.R., Zhang W. et al. Particle size distribution of total suspended sediments in urban stormwater runoff: Effect of land uses, precipitation conditions, and seasonal variations // Journal of Environmental Management. — 2024. — Vol. 365. — P. 121467.
193. Yin C., Li L. An investigation on suspended solids sources in urban stormwater runoff using ^{7}Be and ^{210}Pb as tracers // Water Science and Technology. — 2008. — Vol. 57. — № 12. — P. 1945–1950.
194. Zeng J., Huang G., Luo H., Mai Y. et al. First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community // Scientific Reports. — 2019. — Vol. 9. — № 1. — P. 13865.
195. Zhao G., Gao H., Cuo L. Effects of urbanization and climate change on peak flows over the San Antonio River basin, Texas // Journal of Hydrometeorology. — 2016. — Vol. 17. — № 9. — P. 2371–2389..

Приложения

Приложение 1. Перечень основных водоёмов в пределах бассейна р. Сетунь

№	Название	S, га	№	Название	S, га	№	Название	S, га
1	95 кв. Кунцево	2,08	25	Княжеской ул.	0,03	49	Невершкинский 4-ый	0,24
2	Акад. Арцимовича ул.	0,3	26	Кравченко ул. Верхний	2,05	50	Невершкинский 5-ый	0,05
3	Акад. Бакулева ул.	0,36	27	Кравченко ул. Нижний	1,26	51	Невершкинский 5-ый	0,57
4	Беловежской ул.	0,13	28	Красных зорь ул.	2	52	Никулинский 1-ый	0,65
5	Больница 31, 1-ый	0,04	29	Кукринский	0,05	53	Никулинский 2-ой	1,64
6	Больница 31, 2-ой	0,09	30	Кутузова ул.	0,31	54	Никулинский 3-ий	0,3
7	Больница 31, 3-ий	0,49	31	Ленинский	1,03	55	Никулинский 4-ый	0,48
8	Большой Очаковский	5,42	32	Ленинского проспекта	1,78	56	Олимпийский	4,93
9	Вернадского проспекта	0,19	33	Лешин	0,32	57	Очаковский	2,67
10	Витебской ул.	0,72	34	Лобачевской ул.	0,12	58	Очаковского шоссе	0,22
11	Воронцовский 1-ый	0,07	35	Мещерский Большой	8,84	59	Парка 50-летия Октября	0,62
12	Воронцовский 2-ой	0,14	36	Мещерский Малый	0,28	60	Раменки ул. 1-ый	0,22
13	Воронцовский 3-ий	0,15	37	Мещерский Средний	1,69	61	Раменки ул. 2-ой	0,29
14	Воронцовский 4-ый	1,49	38	Минской ул.	0,41	62	Раменки ул. 3-ий	0,08
15	Воронцовский 5-ый	0,08	39	Мичуринского проспекта	0,64	63	Рябиновой ул. 1-ый	1,43
16	Востряковский 1-ый	0,68	40	Мосфильм. 2-го пер. 1	1,82	64	Рябиновой ул. 2-ой	0,78
17	Востряковский 2-ой	0,14	41	Мосфильм. 2-го пер. 2	0,25	65	Староволынской ул.	0,3
18	Востряковский 3-ий	0,12	42	Мосфильм. Довженко ул.	4,26	66	Троекуровский	0,27
19	Востряковский 4-ый	0,19	43	Мосфильмовский 1-ый	0,07	67	Троекуровского пр., 1-ый	0,66
20	Востряковский 5-ый	0,42	44	Мосфильмовский 2-ой	0,1	68	Троекуровского пр., 2-ой	1,04
21	Востряковский 6-ой	0,22	45	Мосфильмовской ул.	0,49	69	Тропаревский	0,93
22	Ген. Дорохова ул. 1-ый	0,25	46	Навершкинский 1-ый	0,12	70	Удальцова ул.	0,11
23	Ген. Дорохова ул. 2-ой	1,05	47	Навершкинский 2-ой	2,12			
24	Дружбы ул.	0,54	48	Навершкинский 3-ий	2,18			

Приложение 2. Перечень водовыпусков в р. Сетунь

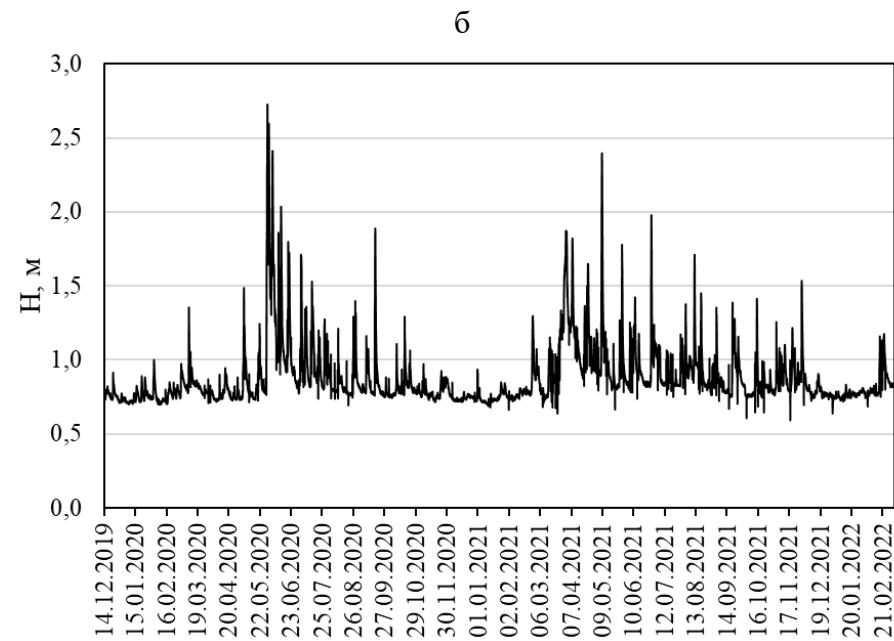
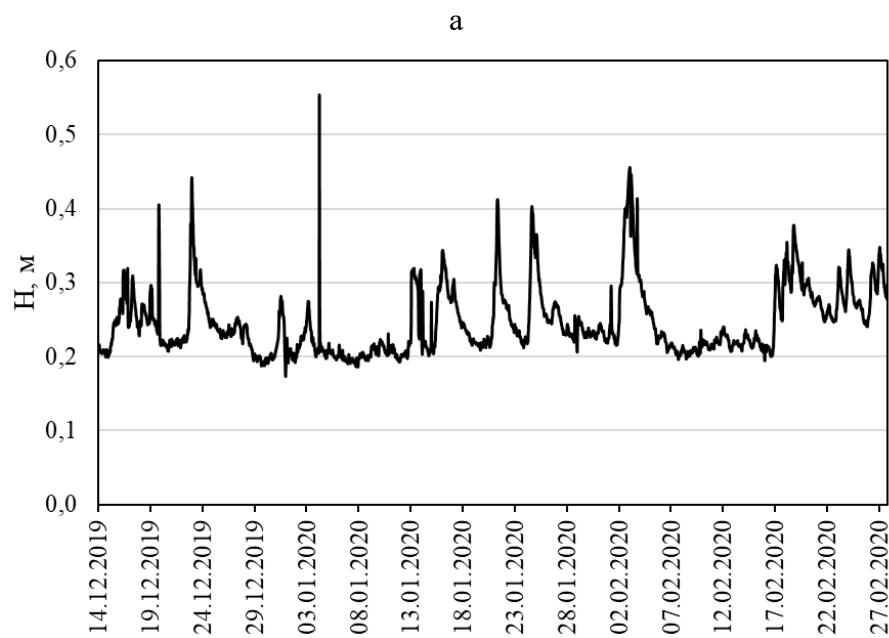
Наименование водовыпусков	L от устья, км	Адрес	Берег	Признаки	Тип	Принадлежность
Аварийный выпуск очистных сооружений	0,04	Воробьевское ш.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Очистных сооружений	0,05	Воробьевское ш.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Выпуск с Воробьевского ш.	0,05	Воробьевское ш.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	0,06	Сетуньский пр-д	правый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Завода душистых веществ	0,17	Сетуньский пр-д	правый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Сетуньского пр-да	0,37	Сетуньский пр-д	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	0,63	Сетуньский пр-д	левый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Выпуск с 2-го Сетуньского пр-да	0,72	2-й Сетуньский пр-д	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Мосфильмовской ул.	0,95	2-й Сетуньский пр-д	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Выпуск с предприятия «Мосэнерго»	1,12	2-й Сетуньский пр-д	левый	дождевой	-	Спецводопользователь
Водовыпуск	1,18	2-й Сетуньский пр-д	правый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Пырьева (Пудовкина) ул.	1,70	ул. Пырьева	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Пудовкина ул.	1,81	ул. Пырьева	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	1,82	ул. Пырьева	правый	дождевой	коллектор	не установлена
Водовыпуск	2,49	2-й Мосфильм. пер.	левый	дождевой	коллектор	не установлена
Ген. Ермолова ул.	2,55	2-й Мосфильм. пер.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Каскада прудов	2,92	2-й Мосфильм. пер.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Река Кипятка	3,26	Матвеевское	правый	речной	коллектор	Мосводосток
Улофа Пальме ул. (Довженко)	3,84	Матвеевское	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Поклонной горы	4,20	Поклонная гора	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Улофа Пальме ул.	4,24	Матвеевское	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
родник	4,28	Матвеевское	правый	речной	-	не установлена
Затопленный водовыпуск	4,30	Матвеевское	правый	дождевой	коллектор	не установлена
Минской улицы	4,51	Минская ул.	левый	дождевой	открытое русло	Мосводосток
Минской улицы	4,55	Минская ул.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
выход грунтовых вод	4,60	Минская ул.	левый	речной	коллектор	не установлена
Минской улицы	4,60	Минская ул.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Река Раменка	4,84	Минская ул.	правый	речной	открытое русло	Мосводосток
Ручей	5,38	Волынский лес	правый	речной	открытое русло	Мосводосток

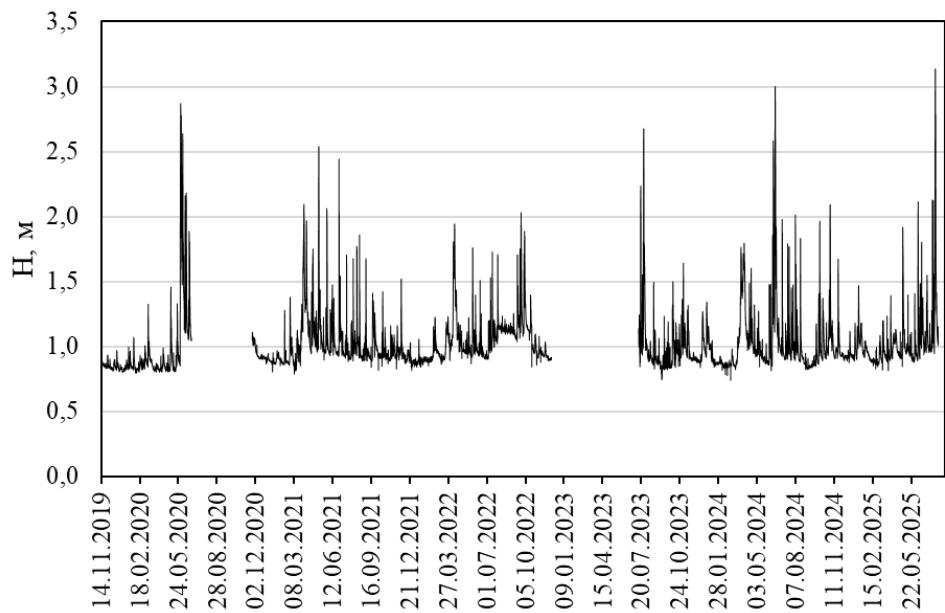
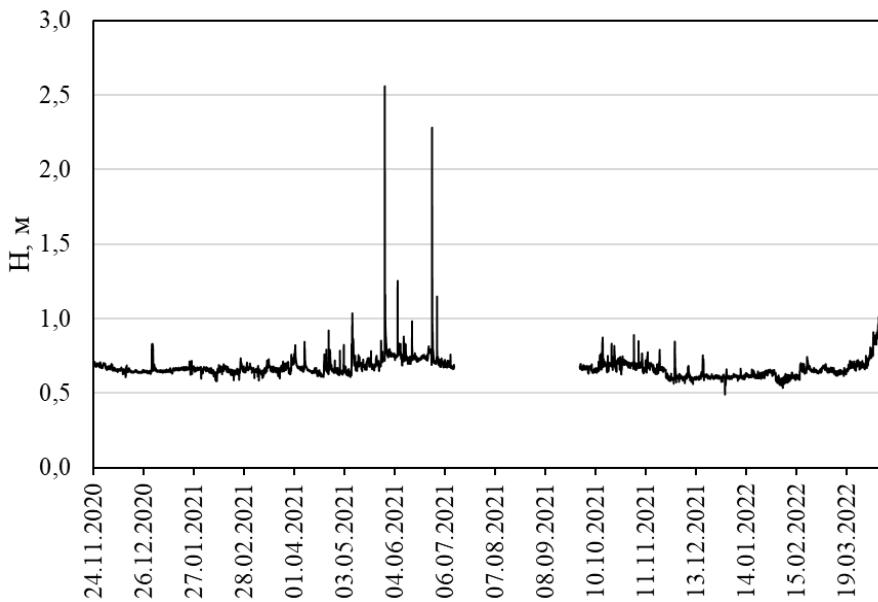
Наименование водовыпусков	L от устья, км	Адрес	Берег	Признаки	Тип	Принадлежность
Давыдковский ручей	6,40	Волынский лес	левый	речной	открытое русло	Мосводосток
Нежинской ул.	6,41	Давыдковская ул.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	7,27	Давыдковская ул.	левый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Кременчугской (Давыдковской) ул.	7,29	Давыдковская ул.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	7,35	Нежинская ул.	левый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Нежинской ул.	7,90	Нежинская ул.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Техногенный родник	7,94	Нежинская ул.	правый	-	-	не установлена
Выпуск на рельеф	8,53	Кременчугская ул.	левый	дождевой	коллектор	не установлена
Выпуск с Нежинской ул.	8,68	Нежинская ул.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Выпуск с Кременчугской ул.	8,76	Кременчугская ул.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	8,82	Кременчугская ул.	левый	дождевой	коллектор	не установлена
Очаково-Матвеевское р-на	9,58	Нежинская ул.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Аминьевского ш.	10,17	Аминьевское ш.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Аквадрома на Аминьевском ш.	10,19	Аминьевское ш.	правый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Аминьевского ш.	10,30	Аминьевское ш.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Река Навершка	10,39	Верейская	правый	речной	открытое русло	Мосводосток
Грязный родник	10,50	Верейская	правый	речной	открытое русло	не установлена
Водовыпуск	10,54	Верейская	правый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Река Ижожка	10,95	Вересаева	правый	речной	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	11,02	Вересаева	левый	дождевой	коллектор	не установлена
Вересаева ул.	11,22	Вересаева	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Выпуск с Московского радиотехнического завода	11,31	Верейская	правый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Водовыпуск	11,32	Верейская	левый	дождевой	коллектор	не установлена
Ручей	11,44	Верейская	правый	речной	коллектор	не установлена
Водовыпуск	11,46	Верейская	правый	дождевой	коллектор	не установлена
Родник	11,60	Верейская	левый	речной	коллектор	не установлена
Водовыпуск	11,92	ул. Багрицкого	левый	дождевой	коллектор	Спецводопользователь
Багрицкого ул.	13,06	ул. Багрицкого	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	13,19	ул. Верейская	левый	дождевой	коллектор	не установлена
Ручей из болота	13,22	ул. Верейская	левый	речной	открытое русло	не установлена
Рябиновой ул.	13,29	ул. Рябиновая	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток

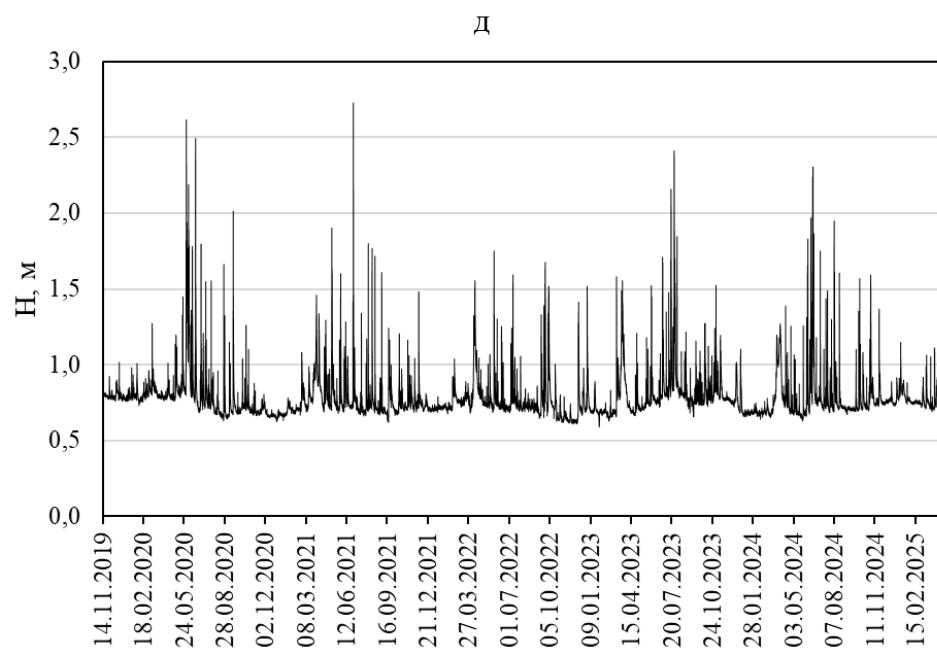
Наименование водовыпусков	L от устья, км	Адрес	Берег	Признаки	Тип	Принадлежность
Рябиновой ул.	13,52	ул. Рябиновая	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Дорогобужской ул. («Можайский»)	13,65	ул. Дорогобужская	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Ручей	14,55	Троекурово	правый	речной	коллектор	Мосводосток
Ручей из Троекуровского озера	14,67	Троекурово	правый	речной	коллектор	Мосводосток
Витебской ул.	15,50	Витебская ул.	правый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Ручей	15,57	Витебская ул.	правый	речной	открытое русло	Мосводосток
Ручей	16,04	Троекурово	левый	речной	открытое русло	Мосводосток
Ручей	16,17	Троекурово	левый	речной	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	16,48	Троекурово	правый	дождевой	коллектор	не установлена
Водовыпуск	16,49	Троекурово	правый	дождевой	-	не установлена
Сколковского ш.	17,10	Сколковское ш.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Ручей из болота	17,17	Сколковское ш.	левый	речной	открытое русло	Мосводосток
Вяземской ул.	17,48	Сколковское ш.	левый	дождевой	коллектор	Мосводосток
Водовыпуск	17,49	МКАД	левый	дождевой	-	Спецводопользователь

Приложение 3. Уровни, измеренные на мониторинговой сети на р. Сетунь

(а – С1, б – С2, в – С3, г – С4, д – С5)



B**Г**



Приложение 4. Подводосборы бассейна р. Сетунь, определённые для модели SWMM

№	Название	Площадь, га	Доля водонепр. покрытий, %	Ширина, м	Уклон, %	Коэффициент Маннинга (n) для поверхностного стока		Глубина понижения уровня воды, мм	
						водонепр.	прониц.	водонепр.	прониц.
1	S1	657,5	14	1682,9	6,0	0,011	0,3	20	40
2	S2	623,9	14	1221,1	6,1	0,011	0,3	20	40
3	S3	2119,4	9	3195,3	5,1	0,011	0,3	20	40
4	S4	698,3	19	1614,2	6,8	0,011	0,3	20	40
5	S5	1169,7	16	1957,2	4,6	0,011	0,3	20	40
6	S6	1903,9	13	3500,0	4,7	0,011	0,3	20	40
7	S7	880,4	17	3938,5	6,2	0,011	0,3	20	40
8	S8	70,8	18	10784,9	6,8	0,011	0,3	20	40
9	S9	1046,7	13	164,6	6,3	0,011	0,3	20	40
10	S10	1045,4	19	2303,4	6,7	0,011	0,3	20	40
11	S11	505,1	10	3746,2	5,4	0,011	0,3	20	40
12	S12	1115,8	12	909,6	4,8	0,011	0,3	20	40
13	S13	172,1	7	5807,1	6,3	0,011	0,3	20	40
14	S14	1323,3	8	342,4	4,4	0,011	0,3	20	40
15	S15	628,3	13	4150,9	4,9	0,011	0,3	20	40
16	S16	863,9	16	2273,6	4,1	0,011	0,3	20	40
17	S17	856,6	8	2623,8	4,4	0,011	0,3	20	40
18	S18	933,4	10	4794,4	3,8	0,011	0,3	20	40
19	S19	1624,2	18	1389,8	4,8	0,011	0,3	20	40
20	S20	699,2	15	2744,3	6,0	0,011	0,3	20	40