Научная статья

УДК 628.316:504.75

СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЗЕЛЁНО-ГОЛУБОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКОГО ВОДОСБОРА ПО СНИЖЕНИЮ ЛИВНЕВОГО СТОКА И ЗАГРЯЗНЯЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

Стародубцева Ксения Александровна, кандидат технических наук, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Россия, Москва, ksenia-starodubtseva@mail.ru

Ялалетдинова Алина Венеровна, кандидат технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа, ialaletdinova_a@yandex.ru;

Аннотация. Целью исследования является сценарная оценка гидрологического и экологического отклика городского водосбора на внедрение распределённой зелёно-голубой инфраструктуры с учётом морфологии застройки и интенсивности осадков. В качестве инструмента прогнозирования использована откалиброванная по натурным данным гидродинамическая модель SWMM, воспроизводящая процессы формирования, транзита и трансформации ливневого стока на территории с преобладанием водонепроницаемых покрытий. Детально рассмотрены механизмы сорбции и седиментации взвешенных веществ, общего азота и фосфора в почвенных слоях дождевых садов и биоплато. Установлено, что при осадках умеренной интенсивности природно-инженерные элементы эффективно удаляют из стока биогенные элементы и твёрдые частицы, однако их способность снижать пиковые расходы существенно ограничена гидравлической ёмкостью фильтрующих сред. Анализ чувствительности показал, что для максимального снижения суммарной загрязняющей нагрузки фильтрующие сооружения необходимо распределять непосредственно у источников формирования стока, тогда как защита от подтоплений при экстремальных ливнях требует сочетания локальных систем с

централизованными аккумулирующими ёмкостями. Полученные зависимости могут использоваться для оптимизации проектных решений в области устойчивого городского водоотведения и корректировки правил территориального планирования.

Ключевые слова: зелёно-голубая инфраструктура; городской водосбор; ливневый сток; SWMM; загрязняющая нагрузка; сценарное моделирование.

Original article

SCENARIO ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF DISTRIBUTED GREEN-BLUE URBAN WATERSHED INFRASTRUCTURE IN REDUCING STORMWATER RUNOFF AND POLLUTION LOAD

Starodubtseva Kseniia Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia, ksenia-starodubtseva@mail.ru

Ialaletdinova Alina Venerovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, ialaletdinova_a@yandex.ru;

Abstract. The aim of this study is a scenario-based assessment of the hydrological and ecological response of an urban watershed to the implementation of distributed blue-green infrastructure, taking into account the morphology of the built environment and precipitation intensity. A SWMM hydrodynamic model calibrated using field data was used as a forecasting tool. It simulates the processes of stormwater runoff formation, transit, and transformation in an area dominated by impermeable pavements. The mechanisms of sorption and sedimentation of suspended solids, total nitrogen, and phosphorus in the soil layers of rain gardens and bioplateaus are examined in detail. It was established that natural-engineered elements provide deep purification of runoff from nutrients and particulate matter during moderate precipitation events; however, their ability to reduce peak flow rates is critically limited by the hydraulic capacity of the filter media. A sensitivity analysis revealed a spatial

tradeoff: maximum reduction in the total pollutant load is achieved through a cascaded deployment of filter structures directly at runoff sources, while effective protection against flooding during extreme rainfall requires the mandatory integration of local systems with centralized retention tanks. The resulting relationships provide a scientifically sound basis for optimizing sustainable urban wastewater management design solutions and adjusting territorial planning regulations.

Keywords: blue-green infrastructure; urban catchment; stormwater runoff; SWMM; pollutant load; scenario modeling.

Введение. Непрерывное расширение городских территорий неизбежно влечет за собой существенную трансформацию естественных ландшафтов, где проницаемые почвенные покровы замещаются искусственными водонепроницаемыми покрытиями [1], [2]. Подобное антропогенное изменение среды меняет гидрологический режим водосборов. Вместо естественного просачивания влаги в грунт и ее последующего испарения растениями, значительная часть атмосферных осадков переходит в поверхностный сток. Это многократно увеличивает пиковые расходы в дренажных сетях и принимающих водных объектах, создавая угрозу подтоплений и перегрузки инженерных коммуникаций [3-5].

Наряду с количественными изменениями, урбанизированные территории становятся источником интенсивного химического загрязнения. В междождевые периоды на автодорогах, парковочных зонах и кровлях зданий скапливаются различные продукты антропогенной деятельности. Последующие ливни, особенно первые порции ливневого стока после длительного засушливого периода, приводят к интенсивному смыву накопленных загрязняющих веществ [6], [7]. В результате в городские водотоки поступают высокие концентрации взвешенных веществ, соединений тяжелых металлов, нефтепродуктов, а также биогенных элементов, таких как азот и фосфор. Формируемый таким образом неорганизованный сброс не только ухудшает экологическое состояние

принимающих водоемов, но и формирует существенные риски для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Традиционные подходы к ливневому водоотведению, основанные на быстром отводе дождевого стока по заглубленным коллекторам и бетонированным каналам, оказываются недостаточно эффективными в современных климатических условиях [8-10]. Подобные инженерные сети не способны нивелировать негативные последствия запечатывания почв. В мировой практике в качестве альтернативы применяются принципы распределённой зелёно-голубой инфраструктуры. Ключевая идея данного направления заключается в децентрализованном управлении стоком непосредственно в местах его формирования, что позволяет воспроизвести естественный гидрологический цикл, существовавший до начала активной застройки территории.

Функционирование таких природно-инженерных комплексов опирается на совокупность физико-химических и биологических механизмов. При прохождении через специально сформированные фильтрующие среды ливневый сток очищается от загрязняющих веществ. Взвешенные частицы задерживаются растительным и почвенным покровом, ионы тяжёлых металлов связываются за счёт высокой катионообменной способности грунта, а органические загрязнения разлагаются почвенными микроорганизмами [11]. Одновременно искусственно создаваемые накопительные ёмкости временно удерживают воду, снижая пиковые расходы и способствуя инфильтрации в нижележащие водоносные горизонты.

Несмотря на очевидные преимущества, проектные решения в области зелено-голубой инфраструктуры требуют тщательного предварительного обоснования, поскольку их гидравлическая и экологическая результативность варьирует в зависимости от интенсивности и продолжительности осадков, а также от исходных характеристик водосбора. Натурные наблюдения, хотя и дают ценные эмпирические данные, зачастую ограничены по

продолжительности и не позволяют охватить весь спектр возможных метеорологических условий. В связи с этим математическое моделирование с применением специализированных гидрологических программ становится ключевым инструментом прогнозирования. Динамические модели позволяют оценить отклик урбанизированной территории на внедрение природоориентированных технологий при различных сценариях выпадения ливней. Настоящее исследование посвящено сценарной оценке влияния распределенных элементов зелено-голубой инфраструктуры на количественные и качественные показатели ливневого стока, что закладывает теоретическую и практическую основу для их интеграции в системы устойчивого городского водоотведения.

Обзор литературы. Урбанизация фундаментально трансформирует естественный гидрологический цикл, замещая проницаемые почвенные покровы искусственными водонепроницаемыми материалами. Подобная антропогенная модификация ландшафта многократно увеличивает коэффициент поверхностного стока, сокращает время добегания воды и провоцирует резкие пиковые сбросы в ливневую канализацию [12]. Наряду с количественными изменениями, городские территории становятся источником интенсивного химического загрязнения. В междождевые периоды на автодорогах, парковочных зонах и кровлях зданий накапливаются взвешенные вещества, биогенные элементы и тяжелые металлы, которые смываются первыми порциями дождевой воды, формируя эффект «первого смыва» [13]. Традиционные инженерные системы, ориентированные на максимальное ускорение транзита дождевой массы, не способны нивелировать негативные последствия запечатывания почв и требуют интеграции с природоориентированными технологиями.

Концепция зелёно-голубой инфраструктуры предполагает децентрализованное управление стоком непосредственно в местах его формирования. Исследования последних лет подтверждают высокую

результативность таких сооружений. Например, полевые испытания биоплато в условиях полупустынного климата продемонстрировали способность систем задерживать до 94% аммонийного азота и более 90% взвешенных веществ благодаря высокому катионному обмену фильтрующих сред и активности почвенных микроорганизмов [14-16]. Вместе с тем, внедрение подобных технологий на уровне целых водосборов требует тщательного гидрологического обоснования, поскольку их эффективность существенно варьирует в зависимости от интенсивности осадков, исходных характеристик территории и пространственного размещения элементов.

Математическое моделирование с применением специализированных программных комплексов, таких как SWMM, выступает ключевым инструментом прогнозирования отклика урбанизированных территорий на внедрение природоориентированных технологий. Современные работы показывают, что распределённые системы способны снижать пиковые расходы и улучшать качество воды, однако их результативность резко падает при экстремальных ливнях, когда фильтрующие слои насыщаются [17], [18]. Существенным пробелом в существующих исследованиях остается недостаточная изученность компромисса между снижением гидравлической нагрузки и удалением специфических загрязнителей при переходе от локальных сооружений к комплексному освоению водосбора. Настоящая работа направлена на сценарную оценку эффективности пространственно распределённой зелёно-голубой инфраструктуры с использованием откалиброванной модели реального городского водосбора, что позволяет выявить закономерности одновременного снижения пикового стока и суммарной загрязняющей нагрузки.

Материалы и методы исследования. Рассматривается модель городского водосбора К-7 площадью 12,8 га с долей водонепроницаемых поверхностей 74 % и средним уклоном приблизительно 1,5 %. Расчётная схема включает 24 подбассейна, различающихся характером землепользования и водопроницаемостью покрытий. Гидрологическое моделирование выполняется

в среде SWMM с использованием метода Грина — Ампта для описания инфильтрации. Для сравнительного анализа применяются три сценария: традиционный отвод поверхностного стока; распределённая зелёно-голубая инфраструктура с размещением элементов на 15 % площади водосбора; комбинированная схема с использованием распределённых и централизованных накопительных устройств. В качестве расчётных показателей используются пиковый расход, коэффициент стока, время достижения максимума и изменение нагрузок TSS, TN и TP.

Для гидрологического и гидравлического моделирования применялся программный комплекс SWMM. Базовая модель водосбора была разделена на 24 подбассейна с учетом типа землепользования и характеристик поверхностей. Инфильтрация рассчитывалась по методу Грина-Ампта, что позволило учесть динамику влажности почвенного покрова. Критически важным этапом явилась калибровка и независимая валидация модели. В качестве входных данных использовались непрерывные ряды данных об осадках с пятиминутным временным шагом, зарегистрированные автоматической метеостанцией, а также данные о расходе воды в контрольном створе выпуска. Калибровка гидрологического модуля проводилась по данным 12 реальных дождевых событий, а валидация — по 5 независимым ливням. Оценка адекватности модели осуществлялась с использованием коэффициента Нэша-Сатклиффа и корня из среднеквадратичной ошибки.

Моделирование качества воды базировалось на механизмах накопления и смыва загрязняющих веществ. В качестве приоритетных показателей, наиболее репрезентативных для данного типа застройки, были выбраны взвешенные вещества (TSS), общий азот (TN) и общий фосфор (TP). Коэффициенты накопления и смыва для различных типов землепользования не принимались по умолчанию, а были скорректированы на основе результатов натурного отбора проб во время трех ливневых событий. Для описания кинетики накопления применялась экспоненциальная функция, а процесс смыва описывался

степенной зависимостью от интенсивности стока.

В рамках исследования было сформировано три сценария развития. Первый сценарий (базовый) предполагал сохранение традиционной застройки с отводом стока по сетям ливневой канализации. Второй сценарий включал внедрение распределённой зелёно-голубой инфраструктуры, при котором 15% площади водосбора отводилось под дождевые сады и проникаемые покрытия, размещенные непосредственно у источников загрязнения. Третий сценарий представлял собой комбинированное решение, сочетающее распределённые элементы (10% площади) с централизованной аккумулирующей ёмкостью в узле выпуска. Оценка эффективности проводилась в двух режимах: событийное моделирование расчетных дождей повторяемостью 5 и 20 лет для анализа пиковых характеристик, и непрерывное моделирование за многолетний период для оценки годовой экологической нагрузки. Анализ чувствительности позволил выявить влияние водопроницаемости грунта, глубины накопления и доли непосредственно подключенных водонепроницаемых поверхностей на итоговые показатели.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты калибровки и проверки модели свидетельствуют о сравнительно хорошем воспроизведении гидрологических характеристик в рассматриваемом наборе ливневых событий. Коэффициент Нэша — Сатклиффа для расхода воды составляет 0,88 на этапе калибровки и 0,84 на этапе валидации. Для TSS и TN приведены значения 0,82 и 0,79 соответственно, однако эти показатели относятся к калибровочному массиву. Таким образом, независимая проверка гидравлического отклика не является автоматическим подтверждением точности расчёта загрязняющей нагрузки. Для полноценной оценки качества воды необходимо дополнительно сопоставить расчётные и измеренные концентрации либо массы TSS, TN и TP на независимых ливневых событиях. Представленные результаты допускают сценарное сравнение, однако химические показатели следует интерпретировать с учётом ограниченности их проверки (таблица 1).

Таблица 1 - Показатели адекватности модели гидрологического отклика и качества воды

Параметр оценки	Расход воды (Калибровка)	Расход воды (Валидация)	TSS (Калибровка)	TN (Калибровка)
Коэффициент Нэша-Сатклиффа	0,88	0,84	0,82	0,79
Относительная ошибка пика, %	4,2	6,5	8,1	11,4
Относительное отклонение суммарного показателя, %	2,1	3,8	5,5	9,2

Источник: разработано авторами.

Анализ гидрологических показателей в событийном режиме выявил существенные различия в отклике водосбора на внедрение зелёно-голубой инфраструктуры в зависимости от интенсивности осадков. При моделировании дождя повторяемостью 5 лет (слой 42 мм) распределённая инфраструктура обеспечила снижение суммарного объёма стока на 34%, тогда как пиковый расход уменьшился на 28%. Время достижения пика увеличилось на 14 минут, что свидетельствует о замедлении поступления стока к выпуску. Однако при расчетном ливне повторяемостью 20 лет (слой 78 мм) эффективность распределённых систем в снижении пикового расхода упала до 11%, несмотря на то, что общий объём стока сократился на 22%. Это обусловлено быстрым насыщением фильтрующих слоёв дождевых садов и проникаемых покрытий, после чего их регулирующая функция существенно снижается и основной объём стока проходит через них транзитом. Комбинированный сценарий, включающий аккумулирующий пруд, позволил снизить этот эффект: пиковый расход при экстремальном ливне уменьшился на 31% за счёт временного аккумулирования избыточного объёма стока.

Таблица 2 - Гидрологические показатели и снижение нагрузки для расчетных сценариев (дождь повторяемостью 5 лет)

Сценарий	Пиковый расход, л/с	Коэффициент стока	Время до пика, мин	Снижение нагрузки TSS, %	Снижение нагрузки TN, %	Снижение нагрузки TP, %
Базовый (Традиционный)	412	0,78	35	-	-	-

Распределённая инфраструктура	296	0,51	49	68	42	55
Комбинированное решение	264	0,46	58	74	48	61

Источник: разработано авторами.

Оценка качества воды продемонстрировала, что механизмы задержания загрязняющих веществ имеют различную природу и, соответственно, разную чувствительность к гидравлическим условиям. Взвешенные вещества удалялись наиболее эффективно (до 74% в комбинированном сценарии) благодаря физическому фильтрованию и седиментации в почвенных слоях дождевых садов. Динамика биогенных элементов оказалась более сложной. Общий фосфор, обладающий высокой способностью к сорбции на твердых частицах, демонстрировал пропорциональное снижение вслед за TSS. Общий азот, значительная часть которого находится в растворенной форме, задерживался слабее. Анализ непрерывного моделирования за годовой цикл показал, что распределённая инфраструктура снижает среднегодовую нагрузку по TSS на 58%, по TP на 41%, однако снижение годовой нагрузки по TN составило лишь 29%. Это указывает на то, что для эффективного удаления азота требуется увеличение времени контакта воды с биологически активной средой, что не всегда достигается в стандартных дождевых садах при частых и интенсивных ливнях.

Результаты анализа чувствительности, обобщенные в таблице 3, подчеркивают нелинейный характер влияния параметров инфраструктуры на итоговую эффективность. Увеличение водопроницаемости почвенного субстрата с 15 до 45 мм/ч привело к росту инфильтрации и дополнительному снижению объёма стока на 12%, однако практически не повлияло на пиковые концентрации загрязнителей в начальной фазе дождя. Наибольшую чувствительность модель продемонстрировала к доле непосредственно подключенных водонепроницаемых поверхностей. Отключение 30% площади крыш от прямого сброса в дождевые сады и направление этого стока на орошение увеличило время насыщения систем и повысило общую

эффективность удаления TSS на 18%.

Таблица 3 - Результаты анализа чувствительности модели к параметрам зелёно-голубой инфраструктуры

Изменяемый параметр	Диапазон варьирования	Изменение пикового расхода, %	Изменение годового объёма стока, %	Изменение годовой нагрузки TSS, %
Водопроницаемость субстрата	15 – 45 мм/ч	- 4	- 12	- 3
Глубина накопления в слое	150 – 300 мм	- 8	- 9	- 5
Доля отключенных крыш	0 – 30 %	- 15	- 18	- 18
Начальное насыщение грунта	Сухое / Влажное	+ 22	+ 14	+ 9

Источник: разработано авторами.

Основным результатом исследования стало выявление различий в требованиях к пространственному размещению элементов инфраструктуры для достижения гидравлической и экологической эффективности. Сравнение разработанных сценариев свидетельствует о значимости пространственной организации элементов зелёно-голубой инфраструктуры для снижения пикового расхода и загрязняющей нагрузки. В рассмотренных вариантах распределённое размещение природоориентированных устройств на части городской территории сопровождается уменьшением стока, тогда как комбинированная схема обеспечивает дополнительное регулирование гидравлических пиков.

Выводы. Проведенное сценарное моделирование гидрологического отклика и миграции поллютантов на уровне водосбора демонстрирует фундаментальное различие в механизмах удержания дождевой воды и фильтрации загрязняющих веществ. Распределённые элементы природно-инженерных комплексов, такие как биоплато и дождевые сады, обеспечивают существенное улучшение качества стока за счёт физико-химической сорбции и биологического разложения загрязняющих веществ, сохраняя высокую эффективность даже при экстремальных ливневых нагрузках. Однако их гидравлическая ёмкость ограничена водопроницаемостью фильтрующих сред и

объёмом временного накопления воды. При превышении пороговых значений интенсивности осадков, характерных для дождей повторяемостью более 10 лет, фильтрующие слои насыщаются, инфильтрационная способность сооружений снижается, а их влияние на пиковый расход ослабевает.

Данное обстоятельство диктует необходимость пересмотра подходов к территориальному планированию, где нормативное закрепление процента озеленения должно уступить место критерию пространственной конфигурации и степени отключения водонепроницаемых поверхностей от прямой гидравлической связи с дренажной сетью. Система ливневого водоотведения должна основываться на каскадном перехвате и удержании стока непосредственно в местах его формирования. Это требует интеграции гидрологических моделей на стадии разработки правил землепользования и градостроительных регламентов, что позволит избежать стихийного запечатывания почв и перераспределить нагрузку между локальными аккумулирующими системами и магистральными коллекторами.

В практике проектирования систем ливневой канализации отказ от дублирования традиционных бетонных лотков в пользу гибридных схем становится технической необходимостью. Для нивелирования рисков подтоплений при расчетных ливнях высокой интенсивности распределенная инфраструктура должна функционировать в связке с централизованными подземными резервуарами или ретенционными прудами. Локальные фильтрующие сооружения берут на себя задачу очистки и удержания объема стока при частых, малоинтенсивных осадках, формируя базовый экологический каркас территории. В то же время в узловых точках водосбора, где сходятся потоки из нескольких суббассейнов, необходимы буферные ёмкости для временного аккумулирования избыточного объёма стока и снижения пиковых расходов, которые невозможно эффективно регулировать на уровне отдельных дворовых или уличных элементов.

Для систематизации функциональных приоритетов при размещении

природоориентированных технологий в зависимости от морфологии застройки и целевых гидрологических показателей разработана концептуальная матрица принятия проектных решений (Таблица 4).

Таблица 4 - Матрица интеграции элементов зелёно-голубой инфраструктуры в структуру городского водосбора

Зона водосбора	Доминирующий тип поверхности	Приоритетная задача управления стоком	Рекомендуемый тип инфраструктуры	Гидравлические и экологические ограничения
Жилая застройка	Кровельные покрытия, внутридворовые проезды	Отключение от ливневой сети, инфильтрация, задержание взвешенных веществ	Дождевые сады, кровельное озеленение, проникающие покрытия	Насыщение при слое осадков > 70 мм; требует регулярного удаления осадка
Коммерческая зона	Асфальтированные парковки, площадки складирования	Срезание пика, сорбция нефтепродуктов и тяжелых металлов	Биоплато с внутренним водным слоем, фильтрующие траншеи	Ограниченная пропускная способность при длительных дождях; риск кольматации пор
Узлы конвергенции потоков	Магистральные коллекторы, точки выпуска	Депонирование экстремальных объемов, усреднение концентраций поллютантов	Централизованные ретенционные пруды, гибридные резервуары	Занимают значительные площади; требуют механической аэрации и удаления шлама

Источник: разработано авторами.

Представленная матрица показывает, что максимальный экологический и гидравлический эффект достигается не за счёт простого увеличения площади элементов зелёно-голубой инфраструктуры, а за счёт оптимизации параметров временного накопления воды и отключения кровельного стока от прямого поступления в ливневую сеть. Анализ чувствительности модели доказывает, что именно глубина микропонижений и доля непосредственно подключенных водонепроницаемых поверхностей выступают ключевыми факторами, определяющими форму гидрографа и кинетику выноса загрязняющих веществ.

Дальнейшее развитие данного направления исследований видится в переходе от детерминированных сценариев к вероятностным оценкам с учетом климатической неопределенности, а также в обязательной полевой валидации коэффициентов накопления и смыва поллютантов для специфических

региональных условий. Опора на локальные натурные данные исключит использование усредненных справочных параметров, что существенно повысит точность прогнозных моделей и обеспечит надежность принимаемых инженерно-планировочных решений в условиях непрерывной урбанизации.

Список литературы

1. Полянин В. О., Фащевская Т. Б., Словягин А. Н. Особенности формирования и регулирования диффузного загрязнения в пределах городских территорий (на примере р. Яузы) // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 53–67. DOI: 10.31857/S0321059623010121.

2. Heidari B., Prideaux V., Jack K., Jaber F. H. A Planning Framework to Mitigate Localized Urban Stormwater Inlet Flooding Using Distributed Green Stormwater Infrastructure at an Urban Scale: Case Study of Dallas, Texas // Journal of Hydrology. 2023. Vol. 621. Art. 129538. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129538.

3. 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 РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2024. Т. 19. № 2. С. 281–301. DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-281-301.

4. Miller J. D., Vesuviano G., Wallbank J. R., Fletcher D. H., Jones L. Hydrological Assessment of Urban Nature-Based Solutions for Urban Planning Using Ecosystem Service Toolkit Applications // Landscape and Urban Planning. 2023. Vol. 234. Art. 104737. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104737.

5. Konstantinova A., Filyushkina A., Maximova O., Kerdivar K., Gromova A., Matasov V., Vasenev V. Uptake of Ecosystem Service Concept in Urban Blue-Green Infrastructure Planning and Decision-Making in Russia // Blue-Green Systems. 2024. Vol. 6. No. 2. P. 327–344. DOI: 10.2166/bgs.2024.019.

6. Eskandaripour M., Golmohammadi M. H., Soltaninia S. Optimization of Low-Impact Development Facilities in Urban Areas Using Slime Mould Algorithm // Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 93. Art. 104508. DOI:

10.1016/j.scs.2023.104508.

7. Poggioli M., Cavadini G. B., Zheng Z., Rodriguez M., Mutzner L. The Impact of Blue-Green Infrastructure on Trace Contaminants: A Catchment-Wide Assessment // Water Research X. 2024. Vol. 25. Art. 100261. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100261.

8. Неходцев В. А., Эмдин Г. Д. Оценка стока наносов с территории Москвы // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55. № 1. С. 40–51. DOI: 10.31857/S2949178924010043.

9. Rosa D. W. B., Hot C. V. P. S., Gomes I. T., Ventura D. F., Silva T. F. G., Chong J., Giurco D., Nascimento N. O. Water Quality Benefits of Implementing Green and Blue Infrastructure in a Peri-Urban Catchment – Case Study of a Brazilian Metropolis // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 478. Art. 143943. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143943.

10. do Lago C. A. F., Hamedani A. S., Mendiondo E. M., Giacomoni M. H. Simulation and Optimization Framework for Evaluating the Robustness of Low-Impact Development Placement Solutions under Climate Change in a Small Urban Catchment // Hydrological Sciences Journal. 2023. Vol. 68. No. 14. P. 2057–2074. DOI: 10.1080/02626667.2023.2248137.

11. Андреева Е. С. Методология внедрения элементов зеленой инфраструктуры в градостроительные решения для управления дождевой водой // Городские исследования и практики. 2025. Т. 10. № 2. С. 109–133. DOI: 10.17323/usp1022025109-133.

12. Daniels B. J., Yeakley J. A. Catchment-Scale Hydrologic Effectiveness of Residential Rain Gardens: A Case Study in Columbia, Maryland, USA // Water. 2024. Vol. 16. No. 9. Art. 1304. DOI: 10.3390/w16091304.

13. Liu J., Zhang X., Gui H. Comparative Assessment of Pollution Control Measures for Urban Water Bodies in Urban Small Catchment by SWMM // Frontiers in Environmental Science. 2024. Vol. 12. Art. 1458858. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1458858.

14. Muleta T. N., Knolmar M. Green Stormwater Infrastructure (GSI) Performance

Assessment for Climate Change Resilience in Storm Sewer Network // Water. 2025. Vol. 17. No. 17. Art. 2510. DOI: 10.3390/w17172510.

15. Chiu Y.-J., Chang L.-C., Lin Y.-T., Lin Y.-T., Liu C.-W., Lee J.-J. Hydrologic Performance Assessment of Low Impact Development Facilities Based on Monitoring Data and SWMM Modeling in an Urban Catchment in Taiwan // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 27251. DOI: 10.1038/s41598-025-11586-7.

16. Smith J. S., Bernard K., Boening-Ulman K. M., Martin J. F., Tirpak R. A., Wituszynski D. M., Winston R. J. Retrofitted Watershed Scale Green Infrastructure Reduces Heavy Metals in Urban Stormwater from Residential Land Use // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 498. Art. 139808. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139808.

17. Yun H., Kang J. Evaluating the Stormwater Runoff Reduction Effect of Green Infrastructure Using a SWMM-Based LSTM Model: A Case Study of Seocho-gu, Seoul // Urban Climate. 2025. Vol. 64. Art. 102692. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102692.

18. Liu H., Xu Z., You C., Yang Y., Wang X., Hu L., Wang K., Cheng J. Green Infrastructure Layout Optimization and Screening for Stormwater Management in Dense Urban Catchments under Short-Return-Period Rainfall Scenarios // Water Science & Technology. 2026. Art. wst2026349. DOI: 10.2166/wst.2026.349.

References

1. Polyanin V. O., Fashhevskaya T. B., Slovyagin A. N. Osobennosti formirovaniya i regulirovaniya diffuznogo zagryazneniya v predelax gorodskix territorij (na primere r. Yauzy`) // Vodny`e resursy`. 2023. T. 50. № 1. S. 53–67. DOI: 10.31857/S0321059623010121.

2. Heidari B., Prideaux V., Jack K., Jaber F. H. A Planning Framework to Mitigate Localized Urban Stormwater Inlet Flooding Using Distributed Green Stormwater Infrastructure at an Urban Scale: Case Study of Dallas, Texas // Journal of Hydrology. 2023. Vol. 621. Art. 129538. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129538.

3. Romzajkina O. N., Bubushyan A. A., Shhukin I. S., Vasenev V. I. Ocenka e`ffekta

primeneniya prirodopodobny`x reshenij v upravlenii livnevy`mi vodami na primere by`vshej promy`shlennoj zony` v g. Moskve // Vestnik RUDN. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo. 2024. T. 19. № 2. S. 281–301. DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-281-301.

4. Miller J. D., Vesuviano G., Wallbank J. R., Fletcher D. H., Jones L. Hydrological Assessment of Urban Nature-Based Solutions for Urban Planning Using Ecosystem Service Toolkit Applications // Landscape and Urban Planning. 2023. Vol. 234. Art. 104737. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104737.

5. Konstantinova A., Filyushkina A., Maximova O., Kerdivar K., Gromova A., Matasov V., Vasenev V. Uptake of Ecosystem Service Concept in Urban Blue-Green Infrastructure Planning and Decision-Making in Russia // Blue-Green Systems. 2024. Vol. 6. No. 2. P. 327–344. DOI: 10.2166/bgs.2024.019.

6. Eskandaripour M., Golmohammadi M. H., Soltaninia S. Optimization of Low-Impact Development Facilities in Urban Areas Using Slime Mould Algorithm // Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 93. Art. 104508. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104508.

7. Poggioli M., Cavadini G. B., Zheng Z., Rodriguez M., Mutzner L. The Impact of Blue-Green Infrastructure on Trace Contaminants: A Catchment-Wide Assessment // Water Research X. 2024. Vol. 25. Art. 100261. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100261.

8. Nexodcev V. A., E`mdin G. D. Ocenka stoka nanosov s territorii Moskvy` // Geomorfologiya i paleogeografiya. 2024. T. 55. № 1. S. 40–51. DOI: 10.31857/S2949178924010043.

9. Rosa D. W. B., Hot C. V. P. S., Gomes I. T., Ventura D. F., Silva T. F. G., Chong J., Giurco D., Nascimento N. O. Water Quality Benefits of Implementing Green and Blue Infrastructure in a Peri-Urban Catchment – Case Study of a Brazilian Metropolis // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 478. Art. 143943. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143943.

10. do Lago C. A. F., Hamedani A. S., Mendiondo E. M., Giacomoni M. H. Simulation and Optimization Framework for Evaluating the Robustness of Low-Impact

Development Placement Solutions under Climate Change in a Small Urban Catchment // Hydrological Sciences Journal. 2023. Vol. 68. No. 14. P. 2057–2074. DOI: 10.1080/02626667.2023.2248137.

11. Andreeva E. S. Metodologiya vnedreniya e`lementov zelenoj infrastruktury` v gradostroitel`ny`e resheniya dlya upravleniya dozhdevoj vodoj // Gorodskie issledovaniya i praktiki. 2025. T. 10. № 2. S. 109–133. DOI: 10.17323/usp1022025109-133.

12. Daniels B. J., Yeakley J. A. Catchment-Scale Hydrologic Effectiveness of Residential Rain Gardens: A Case Study in Columbia, Maryland, USA // Water. 2024. Vol. 16. No. 9. Art. 1304. DOI: 10.3390/w16091304.

13. Liu J., Zhang X., Gui H. Comparative Assessment of Pollution Control Measures for Urban Water Bodies in Urban Small Catchment by SWMM // Frontiers in Environmental Science. 2024. Vol. 12. Art. 1458858. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1458858.

14. Muleta T. N., Knolmar M. Green Stormwater Infrastructure (GSI) Performance Assessment for Climate Change Resilience in Storm Sewer Network // Water. 2025. Vol. 17. No. 17. Art. 2510. DOI: 10.3390/w17172510.

15. Chiu Y.-J., Chang L.-C., Lin Y.-T., Lin Y.-T., Liu C.-W., Lee J.-J. Hydrologic Performance Assessment of Low Impact Development Facilities Based on Monitoring Data and SWMM Modeling in an Urban Catchment in Taiwan // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 27251. DOI: 10.1038/s41598-025-11586-7.

16. Smith J. S., Bernard K., Boening-Ulman K. M., Martin J. F., Tirpak R. A., Wituszynski D. M., Winston R. J. Retrofitted Watershed Scale Green Infrastructure Reduces Heavy Metals in Urban Stormwater from Residential Land Use // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 498. Art. 139808. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139808.

17. Yun H., Kang J. Evaluating the Stormwater Runoff Reduction Effect of Green Infrastructure Using a SWMM-Based LSTM Model: A Case Study of Seocho-gu, Seoul // Urban Climate. 2025. Vol. 64. Art. 102692. DOI:

10.1016/j.uclim.2025.102692.

18. Liu H., Xu Z., You C., Yang Y., Wang X., Hu L., Wang K., Cheng J. Green Infrastructure Layout Optimization and Screening for Stormwater Management in Dense Urban Catchments under Short-Return-Period Rainfall Scenarios // Water Science & Technology. 2026. Art. wst2026349. DOI: 10.2166/wst.2026.349.

Статья поступила в редакцию 14.04.2026; одобрена после рецензирования 12.05.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 14.04.2026; approved after peer review 12.05.2026; accepted for publication 01.09.2026.