



Озеленение населенных пунктов Landscaping of settlements

DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-281-301

EDN: HHNGTI

УДК 502.36:551.578.1(47+57–25)

Научная статья / Research article

Оценка эффекта применения природоподобных решений в управлении ливневыми водами на примере бывшей промышленной зоны в г. Москве

О.Н. Ромзайкина¹  , А.А. Бубушян², И.С. Щукин³ , В.И. Васенев¹ ¹Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация²Ассоциация Гильдия ландшафтных инженеров, г. Москва, Российская Федерация³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь,
Российская Федерация romzaykina-on@rudn.ru

Аннотация. Развитие водно-зеленой инфраструктуры — новое, но активно развивающееся направление в городской экологии и планировании, особенно актуальное в контексте глобальных климатических изменений, которые помимо повышения температуры приводят к учащению нехарактерных для средней полосы ливневых осадков. Ситуацию с подтоплением территорий существенно ухудшают не только высокая доля водонепроницаемых покрытий в городе, но и затрудняющие поверхностный сток недостаточные уклоны вертикальной планировки, характерные для старых районов города или территорий бывших промышленных зон. Повышение вероятности ливневых осадков приводит к дополнительной нагрузке на инженерные коммуникации и заставляет задуматься об альтернативных решениях, таких как дождевые сады. В исследовании оценивалась эффективность снижения рисков подтопления в результате применения дождевых садов на территории планируемого жилищного комплекса в Московском

© Ромзайкина О.Н., Бубушян А.А., Щукин И.С., Васенев В.И., 2024

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

мегаполисе. Результаты моделирования уклонов поверхности территории показали, что 1/3 территории без учета автомобильных дорог имеет неблагоприятный уклон (менее 0,5 %) для формирования поверхностного стока на озелененных участках. При этом наиболее неблагоприятные участки с уклоном ниже 0,003 (0,3 %) составляют 13,7 % территории. Также было определено, что преобладающим типом водосборных поверхностей территории являются водосборы депрессионных форм рельефа, для которых наиболее подходящее решение по отводу поверхностного стока — дождевые сады. При этом увеличение площади дождевых садов до 1,5...5 % от водосборной территории различных функциональных зон показало снижение расчетных расходов поверхностного стока с 0 до 78 %. Наибольшее снижение наблюдали при увеличении площади дождевых садов до 3 %, а дальнейшее увеличение дает незначительный эффект. При этом для рекреационных зон с преобладанием открытых типов поверхности, напротив, замена газона на дождевые сады более чем на 2 % площади избыточна, поэтому при увеличении доли дождевых садов в парках на территории исследования величина перелива стремится к нулю. Таким образом, для объекта исследования площадью 95 га наиболее эффективная площадь дождевых садов — 2,5 га, при этом в рекреационных зонах под дождевые сады рекомендуется использовать только 0,5 га.

Ключевые слова: дождевые сады, водно-зеленая инфраструктура, ландшафтное планирование, поверхностный сток, ливневая канализация

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. О.Н. Ромзайкина — анализ полученных данных, написание текста; А.А. Бубушян — обработка пространственных данных; И.С. Щукин — расчетная часть и написание текста; В.И. Васенев — концепция и дизайн исследования.

Финансирование. Расчеты, пространственный анализ, а также подготовка статьи были выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23–77–01069).

История статьи: поступила в редакцию 16 марта 2024 г., принята к публикации 17 апреля 2024 г.

Для цитирования: 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. doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-281-301

The effects of implementation of nature-based solutions in stormwater management for the case of a former industrial zone in Moscow

Olga N. Romzaykina¹  , Alina A. Bubushyan²,
Igor S. Shchukin³ , Vyacheslav I. Vasenev¹ 

¹RUDN University, Moscow, Russian Federation

²NCO Association Landscape Engineers Guild, Moscow, Russian Federation

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

 romzaykina-on@rudn.ru

Abstract. The development of blue-green infrastructure is a new, but dynamic trend in urban ecology and city planning, especially relevant in the global climate change context, that in addition to increasing temperatures leads to intensification of storm precipitation unusual for the middle zone. The situation with surface flooding is significantly worsened not only by the high percentage of impermeable surfaces in the city, but also by small

slopes, which lead to the difficulties of surface runoff. This factor is typical for old city districts or former industrial areas. The increasing storm rainfall leads to additional load on engineering communications and forces to think about alternative solutions, such as rain gardens. The paper evaluated the efficiency of flood risk reduction due to the application of rain gardens on the territory of the projected residential complex in the Moscow megalopolis. The results of modeling the surface slopes of the territory showed that $\frac{1}{3}$ of the territory excluding highways has an unfavorable slope (less than 0.5%) for the formation of surface runoff in green areas. At the same time, the most unfavorable areas with slope below 0.003 (0.3%) account for 13.7% of the territory. It was also determined that the predominant type of catchment surfaces of the territory are catchments of depressional landforms, the most suitable solution for surface runoff drainage for which are rain gardens. At the same time, an increase in the area of rain gardens from 1.5 to 5% of the catchment area of various functional zones showed a decrease in the calculated surface runoff rates from 0 to 78%. The greatest reduction was observed when increasing the area of rain gardens up to 3%, and further increase gave insignificant effect. At the same time, for recreational areas, replacing lawn to rain gardens by more than 2% is excessive, so when the proportion of rain gardens in parks in the study area is increased, the value of overflow tends to zero. Thus, the most effective area of rain gardens for the case study (area — 95 ha) is 2.5 ha, while in recreational zones it is recommended to use only 0.5 ha for rain gardens.

Keywords: rain garden, blue-green infrastructure, landscape planning, surface runoff, storm water drainage

Conflict of interests. The authors declare that they have no conflict of interests.

Author contributions. O.N. Romzaykina analyzed the data, wrote the manuscript; A.A. Bubushyan processed spatial data; I.S. Shchukin analyzed the data, wrote the manuscript; V.I. Vasenev developed and designed experiments.

Acknowledgements. Processing, spatial analysis, and preparation of the article were supported by the Russian Science Foundation (project No. 23–77–01069).

Article history: Received: 16 March 2024. Accepted: 17 April 2024.

For citation: Romzaykina ON, Bubushyan AA, Shchukin IS, Vasenev VI. The effects of implementation of nature-based solutions in stormwater management for the case of a former industrial zone in Moscow. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2024;19(2):281–301. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-281-301

Введение

Проблема изменения климата стоит достаточно остро не только в связи с последствиями для продовольственной безопасности, но и влиянием на комфортность и безопасность жизни в городах¹. Согласно шестому оценочному докладу ООН риски климатических изменений в ближайшие десятилетия будут только нарастать, при этом будет увеличиваться уязвимость городских экосистем [1–3]. Увеличение выбросов парниковых газов напрямую приводит к повышению температуры, в результате чего южные циклоны проходят дальше на север, приводя к увеличению экстремальных ливневых осадков на территориях, для которых ранее такие погодные явления не были характерными. Так, за последние 30 лет количество ливневых осадков, нанесших ущерб и вред экономике и населению России, увеличилось в несколько раз [4]. При этом в городах с большим количеством в атмосфере аэрозолей, выступающими в виде ядер концентраций, частота сильных дождей значительно выше, чем на фоновых территориях².

¹ UN. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development: Resolution Adopted by the General Assembly on 25 September 2015.

² Доклад о климатических рисках на территории Российской РФ / отв. ред. В.М. Катцов. СПб.: Климатический центр Росгидромета, 2017.

Наряду с рисками затопления, активный поверхностный сток способствует переносу различных загрязняющих веществ [5, 6]. Так, например, основным источником загрязнения окружающей среды в Московском мегаполисе является автотранспорт, помимо атмосферы, активный перенос дождевым и талым стоком продуктов использования горюче-смазочных материалов и эксплуатации автомобилей (например, образующихся в ходе износа шин и тормозных колодок) загрязняет природные компоненты городской экосистемы [7–9].

Рост численности городского населения приводит не только к увеличению площади урбанизированных территорий, но и к более эффективному использованию внутригородских территорий, например, проект Правительства Москвы по комплексному развитию территорий предусматривает освоение бывших промышленных зон³ под новые точки притяжения, включая селитебные, общественные и рекреационные объекты. Это одна из эффективных стратегий мастер-планирования городов. Однако, промышленные территории отличаются низкой долей озеленения, загрязненными грунтами и преобладанием незначительных уклонов от 0,003 до 0,05⁴, что повышает стоимость реализации объектов, удешевить которую в значительной степени позволяет организация новых пространств с минимальными изменениями уклонов (до 0,005), однако, такой подход может осложнять поверхностный сток на озелененных участках.

Устройство традиционных систем ливневой канализации является сложным и дорогостоящим мероприятием независимо от функционального назначения объекта [10]. При этом одним из важнейших вопросов является решение по сбросу отводимой по сети ливневой канализации поверхностных сточных вод, в т. ч. подвергшихся очистке. Сложности возникают и с подключением подземной трубопроводной сети дождевой канализации крупных объектов застройки к существующим коллекторам, которые, как правило, и так перегружены [11]. В случае отсутствия поблизости к проектируемому объекту доступных для подключения централизованных систем отведения поверхностного стока появляется необходимость проектирования отдельной автономной системы ливневой канализации, включающей трубопроводную сеть и очистные сооружения перед сбросом в водный объект. При этом получившие распространение очистные сооружения механической и физико-химической очистки поверхностного стока характеризуются высокой стоимостью строительства и эксплуатации, а также приводят к отчуждению территории на площадке застройки под строительство очистных сооружений [12]. Дополнительно усложняет и удорожает водоотведение отсутствие выраженного уклона территории со значительной площадью, т. е. при самотечной работе сетей ливневой канализации увеличивается глубина заложения сети на концевых участках.

Поэтому в современном городе необходимо организовывать устойчивое управление поверхностным стоком за счет озеленения и архитектурно-планировочных

³ Московская программа комплексного развития территорий // Проект Правительства Москвы. Режим доступа: <https://quarters.ru> Дата обращения: 12.01.2024.

⁴ СП 18.13330.2019. Производственные объекты. Планировочная организация земельного участка (СНиП П-89–80* «Генеральные планы промышленных предприятий»). М., 2019. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/564221198> Дата обращения: 15.12.2023.

решений улиц и рекреационных зон. В конце 2021 г. на выездном заседании комитета по науке, образованию и культуре были представлены положения Стратегии развития природоподобных (конвергентных) технологий в РФ, которая подчеркивает важность замены или дополнения промышленных технологий природоподобными технологиями, не наносящими вред окружающей среде⁵. Одним из инструментов развития водно-зеленой инфраструктуры города является проектирование дождевых садов. Это элемент озеленения, представляющий собой пониженный участок рельефа, как правило заполненный почвогрунтом с высаженными многолетними травянистыми растениями, который принимает сток от дождей и талого снега. Попавший в дождевые сады сток впитывается в грунт или медленно выпускается в ливневую канализацию, тем самым снижая нагрузку на систему ливневой канализации и очистные сооружения как по пиковым расходам и общему объему отводимых вод, так и по загрязняющим веществам.

В дождевые сады высаживаются ассортимент из морозоустойчивых влаголюбивых растений, способных впитывать и очищать воду в необходимых объемах. При этом дождевые сады в отличие от традиционных очистных сооружений не изымают территорию из использования, а органично вписываются в нее и являются элементами благоустройства и озеленения. Благодаря использованию трав и цветущих многолетних растений дождевые сады являются эффективным и красивым способом отведения поверхностного стока в городских общественных пространствах.

Однако, на текущий момент по внедрению природоподобных решений Россия значительно отстает от стран ЕС, США и Китая. Например, в США первые дождевые сады появились в 1990-х гг. [13, 14]. Технология быстро набрала популярность сначала в США, а затем распространилась по всему миру, тогда как в России дождевые сады начали появляться совсем недавно с Санкт-Петербурга⁶, Перми⁷ и Тюмени⁸. Одно из основных ограничений для широкого распространения водно-зеленых решений является недостаток убедительных доказательств их эффективности. Поэтому **целью исследования** стала оценка эффекта применения природоподобных решений для снижения проблем затопления территории с минимальным уклоном и снижения нагрузки на ливневую канализацию.

Материалы и методы исследования

Объект исследования — бывшая промышленная территория в Даниловском районе Южного административного округа города Москвы общей площадью 113 га, что составляет практически 10 % от площади района по данным ресурса

⁵ Хадькин М. Наука для жизни: как в РФ будут развивать природоподобные технологии // Известия. 29.11.2021. Режим доступа: <https://iz.ru/1256928/maksim-khodykin/nauka-dlia-zhizni-kak-v-rf-budut-razvivat-prirodopodobnyie-tekhnologii> Дата обращения: 25.11.2023.

⁶ Озерный парк в Новом Девяткино // АЛАРОС. 03.12.2020. Режим доступа: alaros.ru/news/ozernyj_park_v_novom_devjat_kino/ 2020–12–03–96 Дата обращения: 26.11.2023

⁷ Михеечева А. В Перми состоялось открытие первого дождевого сада в долине реки Егошихи // Муниципальное образование город Пермь. 22.06.2022. Режим доступа: <https://www.gorodperm.ru/news/2022/06/22%2016:05:00+05/58274-id/> Дата обращения: 04.12.2023

⁸ Садырина С. В Тюмени появятся дождевые сады по типу голландских // РБК. 28.11.2021. Режим доступа: <https://t.rbc.ru/tyumen/28/11/2021/61a0a1389a7947f5d12de944> Дата обращения: 25.11.2023.

OpenStreetMap.ru. Архитектурно-градостроительная концепция реорганизации объекта исследования в жилую зону, принятая в 2016 г., помимо жилой зоны включила в себя зеленые насаждения, общественно-деловой кластер, а также объекты школьного и дошкольного образования⁹ (рис. 1).

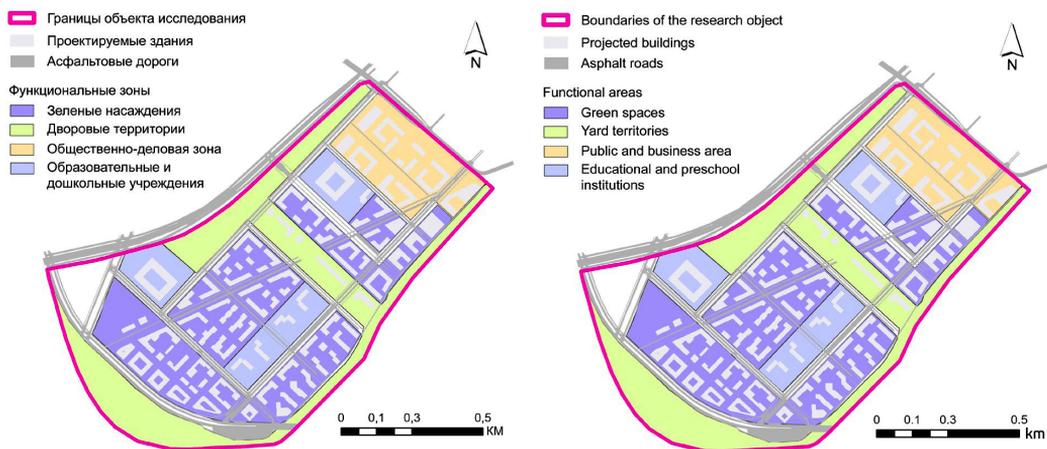


Рис. 1. Планировочная структура проектируемой территории к реконструкции
 Источник: выполнила О.Н. Ромзайкина с помощью ArcGIS Pro 3.2

Fig. 1. Planning structure of the designed area to be reconstructed
 Source: created by O.N. Romzaykina using ArcGIS Pro 3.2

Объект исследования относится к умеренно-континентальной климатической зоне и расположен на I и II надпойменных террасах древнеаллювиальной равнины в окружении ровной и мелковолнистой поймы Москвы-реки [15]. По данным метеостанции Балчуг за последние 10 лет среднегодовые значения температуры составляет $+8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, минимальное значение температуры зафиксировано 07.01.2017 ($-27,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), а максимальное — 23.06.2021 ($+35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Среднее годовое количество осадков составляет 520 мм, максимальное количество за 12 часов — 44 мм — зафиксировано 08.07.2018. Устойчивый снежный покров зачастую лежит со второй декады ноября по начало апреля, среднегодовая высота снежного покрова составляет 20,6 см, максимальная высота отмечена 15.03.2022 — 164 см.¹⁰

Существующая древесная растительность покрывает менее 10% территории преимущественно по краю и представлена в основном самосевом молодой поросли таких видов как тополь белый (*Populus alba*), тополь обыкновенный (*Populus sp.*), береза повислая (*Betula pendula*), клен ясенелистный (*Acer negundo*), осина обыкновенная (*Populus tremula*). Почвы представлены техногенно измененными грунтами (урбоквиземами), преимущественно легкого гранулометрического состава

⁹ Тарабарина Ю. Прекрасный ЗИЛ: отчет о неформальном архсовете // Archi.ru. 17.12.2020. Режим доступа: <https://archi.ru/russia/88188/prekrasnyi-zil-otchet-o-neformalnom-arkhsovete> Дата обращения: 12.10.2023.

¹⁰ ООО «Расписание Погоды». Режим доступа: <https://rp5.ru> Дата обращения: 25.11.2023.

(песок и супесь), с большим количеством антропогенных включений. Проектом предусмотрено создание новых рекреационных зон и озеленение дворов, школ, общественных зон и межквартальных территорий.

Пространственный анализ включал в себя оцифровку мастер-плана территории, построение цифровой модели рельефа (ЦМР) по данным геодезической съемки (8025 точек), определение уклонов поверхности в процентах. Данный блок исследования, включая расчет баланса территории и зональной статистики растровых данных, проведен с использованием программного обеспечения ArcGIS Pro 3.2. Моделирование системы водотоков и оценка типов водосборной поверхности произведены в программном обеспечении Autodesk AutoCAD Civil 3D.

Анализ характеристик поверхностного стока на территории. Для снижения объемов и расходов отводимого по системе ливневой канализации стока предлагается устройство сооружений водно-зеленой инфраструктуры для приема слабозагрязненного поверхностного стока с кровель, тротуаров и озелененных территорий перед сбросом в канализацию. Сток с автодорог при этом предлагается направлять через дождеприемники напрямую в систему ливневой канализации и далее на очистные сооружения. В связи с этим в последующих расчетах оценивались объемы стока без учета площадей автомобильных дорог.

В исследовании было рассмотрено два расчетных случая: 1) когда дождевые сады рассчитаны на прием 70 % годового объема поверхностного стока (сток от дождей с периодом однократного превышения $P = 0,1$ года), что соответствует требованиям п. 7.3.2 СП 32.13330.2018¹¹ для селитебных территорий); 2) когда дождевые сады рассчитаны на прием 100 % годового объема (сток от дождей с периодом однократного превышения $P = 1$ год) поверхностного стока. Для обоих случаев выполнена оценка величины сокращения расчетных расходов стока, отводимых по системе ливневой канализации.

Суммарный объем чаш дождевых садов рассчитан на прием стока от расчетного дождя. Величина расчетного суточного слоя осадков для обоих случаев была принята на основании статистически обработанных данных многолетних наблюдений на ближайшей репрезентативной метеостанции М-2 Москва ВДНХ (СИ — 27612)¹⁰.

Расчетный объем стока W_d , отводимого на очистку (принимаемого дождевыми садами), определялся по формуле

$$W_d = 10ha \cdot \psi_{mid} F, \quad (1)$$

где 10 — переводной коэффициент; ha — максимальный суточный слой осадков за дождь, сток от которого подвергается очистке в полном объеме, мм; ψ_{mid} — средний коэффициент стока для расчетного дождя (определяется как средневзвешенное значение в зависимости от постоянных значений коэффициента стока Ψ_i для разного вида поверхностей); F — площадь стока, га.

Суммарная площадь дождевых садов определялась как отношение объема стока от расчетного дождя, принимаемого дождевыми садами, к расчетной глубине чаш дождевых садов, принятой за 30 см.

¹¹ СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. М., 2019. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> Дата обращения: 15.12.2023.

После определения общей площади дождевых садов производился уточняющий расчет коэффициента стока ψ_{mid} и коэффициента покрова z_{mid} , так как площадь дождевых садов изымалась из площади озеленения. Коэффициенты стока и покрова поверхности дождевых садов при этом принимались как для водонепроницаемых поверхностей.

Ввиду того, что концепция применения сооружений водно-зеленой инфраструктуры предполагает равномерное распределение сооружений по канализуемой территории, дальнейшие расчеты проводились на единичный условно-типовой дождевой сад площадью 30 м².

Далее проводился расчет расходов, поступающих в дождевой сад. Соотношение площади единичного дождевого сада к площади его водосбора и средневзвешенный коэффициент покрова водосбора при этом принимались аналогичными значениям для всей функциональной зоны.

При гидравлическом расчете сетей водоотведения поверхностных сточных вод расходы в сетях водоотведения, л/с, отводящих сточные воды с селитебных территорий, определялись методом предельных интенсивностей, согласно методике, представленной в приложении Ж СП 32.13330.2018¹¹:

$$q_r = \frac{z_{\text{mid}} A^{1,2} F}{t_r^{1,2n-0,1}}, \quad (2)$$

где A , n — параметры, характеризующие интенсивность и продолжительность дождя для конкретной местности; z_{mid} — среднее значение коэффициента покрова, характеризующего поверхность бассейна стока, определяемое как средневзвешенное значение коэффициентов поверхностей на территории водосбора; F — расчетная площадь стока, га; t_r — расчетная продолжительность дождя, равная продолжительности протекания поверхностных вод по поверхности, лоткам и трубам до расчетного участка, мин.

Параметры, характеризующие интенсивность, определялись по формуле

$$A = q_{20} 20^n (1 + \lg P / \lg m_r)^\gamma, \quad (3)$$

где q_{20} — интенсивность дождя для данной местности продолжительностью 20 мин при $P = 1$ год; n — показатель степени; m_r — среднее количество дождей за год; P — период однократного превышения расчетной интенсивности дождя, годы; γ — показатель степени.

Время добегания стока до расчетного створа t_r дождеприемника в случае отсутствия дождевых садов и входа в дождевой сад при их наличии определялось по формуле

$$t_r = t_{\text{con}} + t_{\text{can}}, \quad (4)$$

где t_{con} — продолжительность протекания дождевых вод до уличного лотка (время поверхностной концентрации), принимается равным 2 мин, согласно п. Ж.6 приложения Ж СП 32.13330.2018⁹; t_{can} — продолжительность протекания дождевых вод по уличным лоткам определяется по формуле

$$t_{\text{can}} = 0,021 \sum \frac{l_{\text{can}}}{v_{\text{can}}}, \quad (5)$$

где l_{can} — длина участков лотков, м, принимается равной длине диагонали квадрата с площадью равной площади водосбора дождевого сада; v_{can} — расчетная скорость течения стока на участке, принимаемая 0,7 м/с.

Объем дождевого стока V_d , прошедшего через расчетный створ (поступившего в дождевой сад или дождеприемник) за произвольный период t_r , определяется как произведение расхода в конце периода времени $Q_r(t_r)$ на его продолжительность по формуле

$$V_d = t_r \cdot Q_r(t_r). \quad (6)$$

Перелив поверхностного стока в систему ливневой канализации наступает в момент заполнения «чаши» дождевого сада. Расход перелива $Q_r^{\text{пер}}$ определяется как расход дождевого стока по формуле (2) в момент заполнения «чаши» дождевого сада $t_r^{\text{зап}}$ при $V_d = V_{\text{ч дс}}$. Объем чаши дождевого сада $V_{\text{ч дс}}$ определяется как произведение его площади $S_{\text{дс}}$ на глубину $h_{\text{дс}}$, принимаемую 0,3 м, на основании рекомендаций по проектированию дождевых садов^{12, 13, 14}.

Максимальный расход дренажных вод (фильтрата) $Q_{\text{др}}$, прошедших через фильтрующую загрузку дождевого сада, определяется по формуле

$$Q_{\text{др}} = S_{\text{дс}} \cdot v_{\text{дс}}^{\text{max}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{дс}}$ — площадь дождевого сада в плане, м²; $v_{\text{дс}}^{\text{max}}$ — максимальная (начальная) пропускная способность фильтрующей загрузки дождевых садов на основании рекомендаций по проектированию дождевых садов принимается 0,3 м/ч.

Величина относительного сокращения расчетного расхода в системе ливневой канализации после дождевых садов ΔQ для двух расчетных случаев определена по формуле

$$\Delta Q = \frac{Q_r^{P=1} - Q_r^{\text{пер}} + Q_{\text{др}}}{Q_r^{P=1}} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где $Q_r^{P=1}$ — расчетный расход от дождя с $P = 1$ год; $Q_r^{\text{пер}}$ — расчетный расход перелива дождевого сада; $Q_{\text{др}}$ — расход дренажного стока (фильтрата) дождевого сада, прошедший через фильтрующую загрузку.

Результаты исследования и обсуждение

Оценка благоприятности уклонов проектируемой территории. Исходная территория для будущего жилищного комплекса отличается незначительным перепадом рельефа. 7/8 участка располагается на высоте с перепадом от 121 до 124 м над уровнем Балтийского моря, также на объекте есть незначительные повышения (124...129 м) в зоне с проектируемыми объектами озеленения (рис. 2).

¹² Rain Garden Construction Guide. 2011. URL: <http://www.aucklandcouncil.govt.nz> Accessed: 26.11.2023.

¹³ Stormwater Best Management Practices (BMP) Performance Analysis. URL: <https://www3.epa.gov/region1/npdes/stormwater/tools/BMP-Performance-Analysis-Report.pdf> Accessed: 26.11.2023.

¹⁴ Stormwater Management Design Manual. 2014. URL: <https://www.princegeorgescountymd.gov/DocumentCenter/View/4782> Accessed: 26.11.2023.

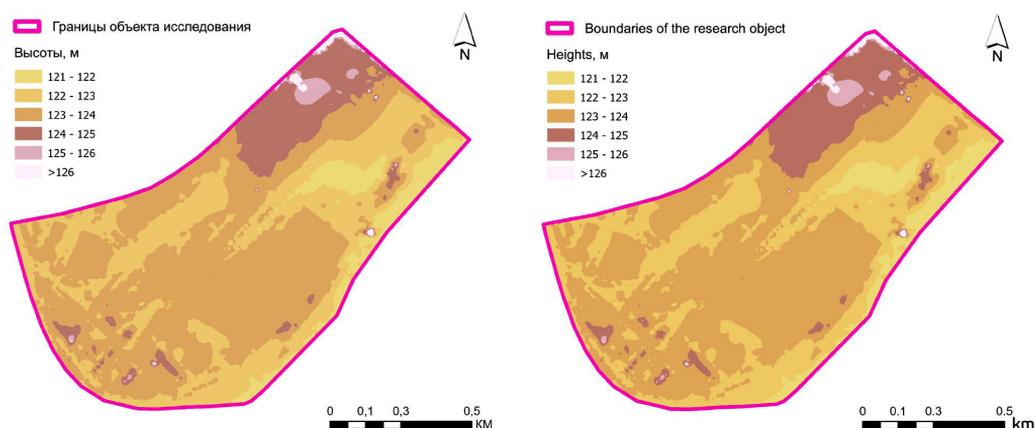


Рис. 2. Цифровая модель рельефа объекта исследования
 Источник: выполнила О.Н. Ромзайкина с помощью ArcGIS Pro 3.2

Fig. 2. Digital elevation model of the study site
 Source: created by O.N. Romzaykina using ArcGIS Pro 3.2

Результаты моделирования уклонов поверхности территории показали, что 2/3 территории без учета автомобильных дорог имеют благоприятный уклон для застройки и поверхностного стока — свыше 0,005 (0,5%), но не более 0,1 (10%). При этом наиболее неблагоприятные участки с уклоном ниже 0,003 (0,3%) составляют 13,7% территории, что в пересчете на общую площадь представляет собой более 13,0 га (рис. 3, табл. 1).

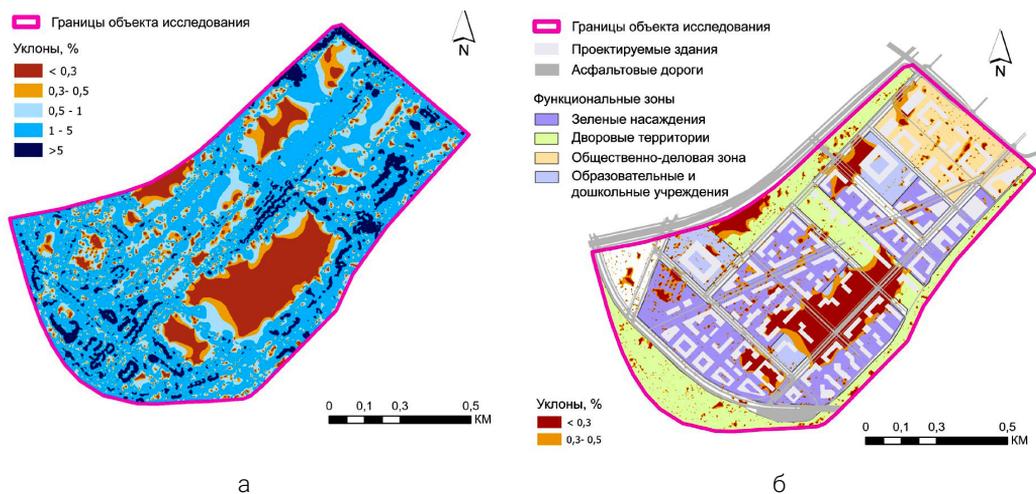


Рис. 3. Картограмма уклонов поверхности объекта исследования (а) и распределение неблагоприятных уклонов по функциональным зонам (б)

Источник: выполнила О.Н. Ромзайкина с помощью ArcGIS Pro 3.2

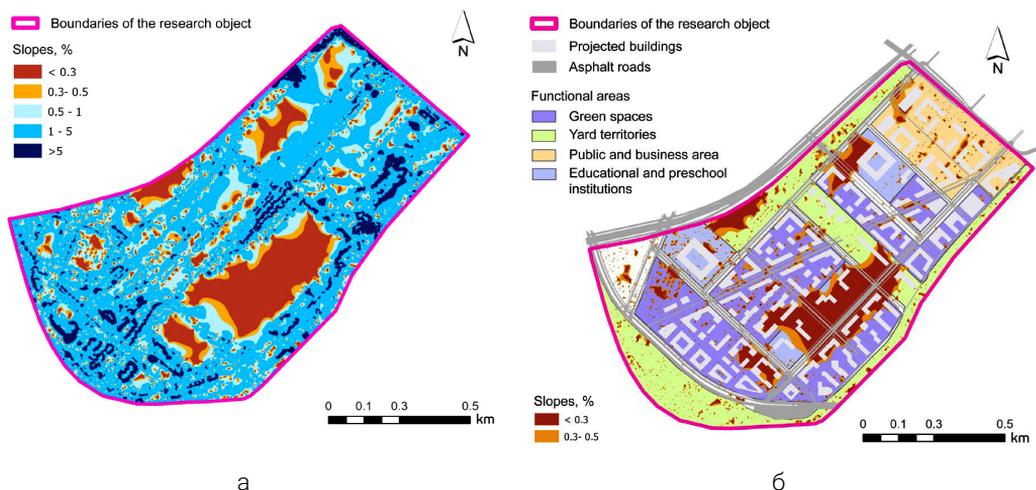


Fig. 3. Map of surface slopes of the study site (a) and distribution of unfavorable slopes by functional zones (б)

Source: created by O.N. Romzaykina using ArcGIS Pro 3.2

Если рассматривать распределение уклонов по функциональным зонам, то практически половина от общей доли участков с уклоном ниже 0,003 (0,3 %) располагается на дворовых территориях — 5,1 га, а также в зоне проектируемых школ и дошкольных учреждений — 4,4 га. Однако, в процентном соотношении для вторых — это 35,2 %. Территории с уклоном от 0,3 до 0,5 % будут обладать минимальным уклоном для формирования стока по твердым покрытиям, однако, в отличие от зеленых насаждений, создание дорожно-тропиночной сети подразумевает под собой мероприятия по вертикальной планировке и созданию как продольных, так и поперечных уклонов. Тогда как уклоны ниже 0,3 % будут по-прежнему недостаточны для формирования стока на озелененных участках, где вертикальная планировка не всегда предусматривается проектами. Таких участков на территории гораздо меньше (общая площадь равна 7,5 га), и они сконцентрированы в основном по периметру участков с недопустимыми уклонами (см. рис. 3). Практически половина таких участков располагается на территориях дворов, занимая суммарную площадь в 3,4 га, а в зоне планируемых парков участки с уклонами от 0,3 до 0,5 % занимают 1,9 га, на территориях школ и дошкольных учреждений — 1,3 га. Наиболее благоприятные исходные условия характерны для общественно-деловой зоны (табл. 1).

Таблица 1

Баланс функциональных зон и доля площадей с различными категориями уклонов на территории исследования

Функциональные зоны	Площадь, га	Доля территории с уклоном, %				
		< 0,3	0,3...0,5	0,5...1	1...5	> 5
Дворовые территории	41,81	12,3	8,1	17,5	53,4	8,7
Общественно-деловая зона	12,99	4,0	7,3	21,1	60,0	7,7
Зеленые насаждения (парки)	27,44	10,6	6,9	16,5	53,5	12,6

Окончание табл. 1

Функциональные зоны	Площадь, га	Доля территории с уклоном, %				
		< 0,3	0,3...0,5	0,5...1	1...5	> 5
Образовательные учреждения (школы и детские сады)	12,74	35,2	10,3	16,8	36,5	1,3
Общая площадь (без учета автомобильных дорог)	94,98	13,7	7,9	17,6	52,1	8,7

Table 1

The balance of functional zones and the proportion of areas with different categories of slopes in the study area

Functional areas	Area, ha	The share of the territory with a slope, %				
		< 0.3	0.3...0.5	0.5...1 %	1...5 %	5 %
Yard territory	41.81	12.3	8.1	17.5	53.4	8.7
Public and business area	12.99	4.0	7.3	21.1	60.0	7.7
Green spaces (parks)	27.44	10.6	6.9	16.5	53.5	12.6
Educational institutions (schools and kindergardens)	12.74	35.2	10.3	16.8	36.5	1.3
Total area (excluding highways)	94.98	13.7	7.9	17.6	52.1	8.7

Оценка условий образования поверхностного стока. Природоподобные решения направлены на решения вопросов с перехватом стока и его инфильтрацией на локальном, а не общегородском уровне. Для проверки гипотезы о целесообразности использования природоподобных решений в качестве альтернативы работ по сплошной вертикальной планировке были проведены моделирование системы водотоков и оценка типов водосборной поверхности на объекте исследования. Анализ водостоков позволил выявить траектории течения стока и определить места затопления. Водосборные бассейны стока были рассчитаны по 5 различным типам, чтобы выявить водосборы впадин (депресссионных форм рельефа) и горизонтальные водосборы, которые больше всего подходят для размещения локальных природоподобных решений. Оценка типов водосборов поверхностей позволила сделать вывод, что на территории преобладают водосборы впадин (экспликация красным цветом). В таких областях есть участки понижений, в которые стекает вода и образуется неопределенный сток. Именно на таких участках понижений предпочтительно устраивать линейные дождевые сады для увеличения скорости инфильтрации. В местах водосборов горизонтальной области (экспликация желтым цветом) целесообразно устраивать полигональные природоподобные решения, например, сухие пруды, такой тип решений предпочтителен для рекреационных объектов. Комбинация двух типов анализа позволяет сделать вывод, что на участках проектируемых школ и дошкольных учреждений предпочтительно устраивать протяженные дождевые сады, тогда как, например, в дворовой зоне есть участки, где целесообразнее размещать как линейные дождевые сады, так и дождевые сады сложной формы, образующие сеть водно-зеленых решений.

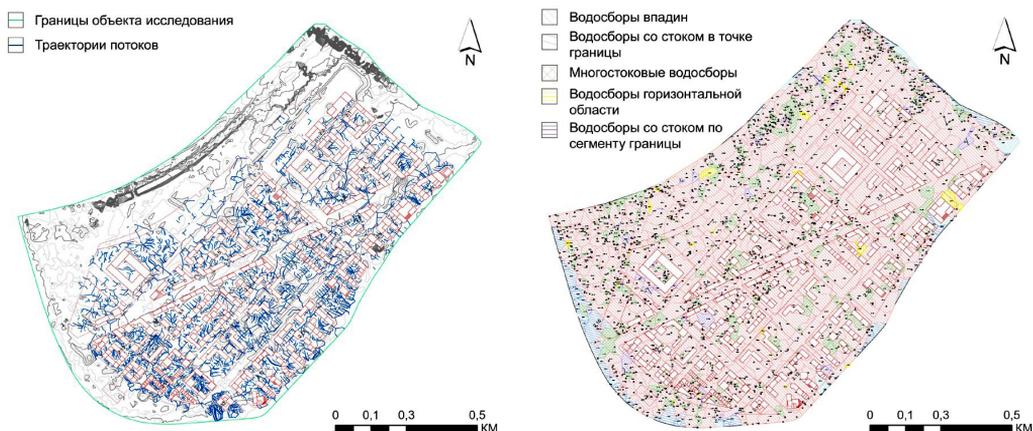


Рис. 4. Картограмма траекторий потоков воды и типов водосборов на объекте исследования
 Источник: выполнила А.А. Бубушян с помощью Autodesk AutoCAD Civil 3D

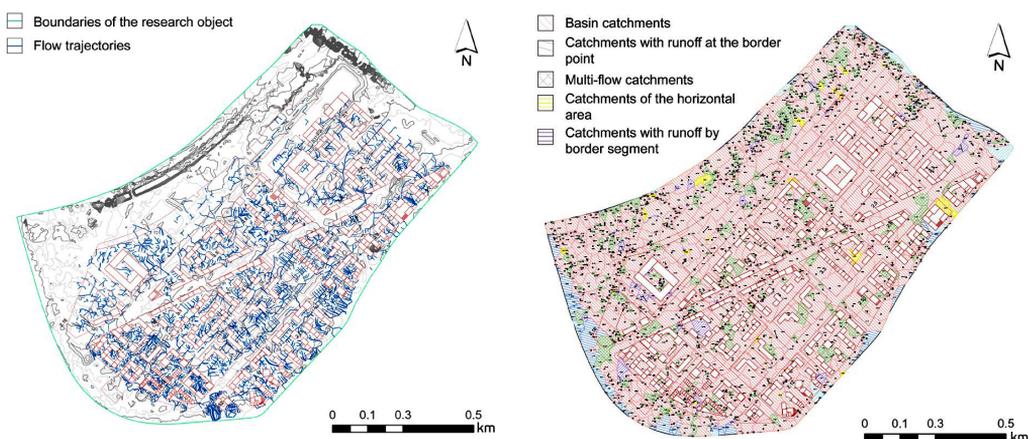


Fig. 4. Map of water flow trajectories and catchment types at the study site
 Source: created by A.A. Bubushyan using Autodesk AutoCAD Civil 3D

Оценка количественных характеристик поверхностного стока. Данный блок исследований был направлен на определение наиболее эффективной доли водно-зеленых решений для предотвращения временного подтопления территории в ходе ливневых осадков с помощью инфильтрации.

На основании обработки метеоданных о распределении суточных слоев дождевых осадков за теплый период года (рис. 5) по методике, представленной в приложении Е СП32.13330.2018¹¹, была определена величина слоя осадков, обеспечивающих 70 и 100 % годового объема. Так, максимальный суточный слой дождевых осадков, при котором обеспечивается прием на очистные сооружения 70 % суммарного годового количества осадков (ha_{70} %), составил 7,24 мм, а 100 % суммарного количества годового осадков (ha_{100} %) — при слое 30 мм.

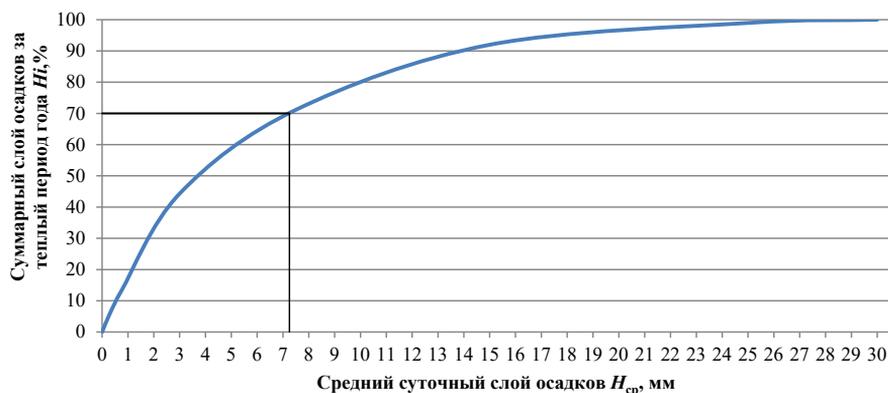


Рис. 5. Распределение суточных слоев дождевых осадков за теплый период
 Источник: выполнил И.С. Щукин

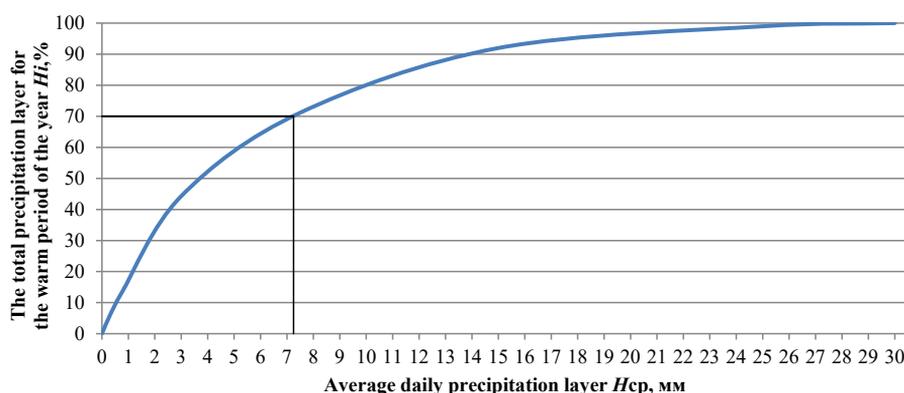


Fig. 5. Distribution of daily rainfall layers for the warm period
 Source: created by I.S. Shchukin

При анализе водосборной поверхности различных функциональных зон дополнительно были определены площади озеленения, кровель, непроницаемых и проницаемых покрытий на основе оцифрованного генерального плана концепции территории. Открытые поверхности (озеленение) составляют 42,5 % (40,37 га) от площади без учета автомобильных дорог. Данный тип поверхностей включает в себя не только парки, но и внутри- и межквартальное озеленение. Доля пешеходных асфальтированных тротуаров и площадок составляет 12,1 %, а водопроницаемых покрытий (включая плитку, песок и набивные типы покрытий) — 25,6 %, кровли зданий и сооружений — 19,8 %. Таким образом, территория жилого комплекса обладает достаточно высоким уровнем запечатанности в сравнении с дистанционными исследованиями на уровне города [16], однако, если рассматривать Южный и Центральный административные округа, где значения запечатанности свыше 60 % (по данным OSM), а также учитывать высокую долю водопроницаемых покрытий объекта исследования, то территория проектирования имеет благоприятные исходные условия фильтрации поверхностного стока без учета данных о ливневой системе.

С учетом типов и площадей поверхности на основе табличных значений СП 32.13330.2018¹¹ были также вычислены средневзвешенные значения коэффициентов стока и покрова для каждой функциональной зоны и объекта в целом (табл. 2).

Таблица 2

Параметры водосборной площади различных функциональных зон

Функциональная зона	Площадь водосборных поверхностей, га					Коэффициент стока ψ_{mid}	Коэффициент покрова z_{mid} при $P = 1$ год
	$F_{общ}$	Озеленение	Кровли	Непроницаемые покрытия	Проницаемые покрытия		
Дворовые территории	41,81	10,73	12,35	7,29	11,44	0,64	0,198
Общественно-деловая зона	12,99	4,72	3,24	1,38	3,66	0,54	0,173
Зеленые насаждения (парки)	27,44	19,67	0,74	0,15	6,88	0,25	0,092
Образовательные учреждения	12,74	5,25	2,49	2,67	2,34	0,54	0,166
Итого	94,98	40,37	18,82	11,49	24,32	Средневзв. 0,37	Средневзв. 0,160

Table 2

Parameters of the catchment area of various functional zones

Functional areas	Catchment area, Ha					Drain coefficient ψ_{mid}	The coefficient of protection z_{mid} $P = 1$
	F_{total}	Green zones	Roofs	Impermeable coatings	Permeable coatings		
Yard territory	41.81	10.73	12.35	7.29	11.44	0.64	0.198
Public and business area	12.99	4.72	3.24	1.38	3.66	0.54	0.173
Green spaces (parks)	27.44	19.67	0.74	0.15	6.88	0.25	0.092
Educational institutions	12.74	5.25	2.49	2.67	2.34	0.54	0.166
Total area	94.98	40.37	18.82	11.49	24.32	Weighted average 0.37	Weighted average 0.160

Расчеты снижения расходов при устройстве дождевых садов показали, что площадь дождевых садов, определенная для приема поверхностного стока от осадков со слоем 7,24 мм, который обеспечивает 70 % годового объема поверхностного стока, составляет 0,6...1,5 % площади водосборной территории для различных функциональных зон. При этом данной площади дождевых садов недостаточно для снижения пиковых расходов от расчетных дождей с периодом однократного превышения $P = 1$ год. В случае с пиковыми расходами площади дождевых садов

увеличиваются с 2,5 до 6,4 % от общей площади водосбора. Полученные результаты на полностью совпадают с рекомендациями, разработанными для разных штатов США, где площадь дождевых садов рекомендуют принимать за 5...8 % от доли запечатанных покрытий. Так в случае с приемом дождя 7,24 мм ($P = 0,1$) площади дождевых садов для всех зон, за исключением парков, варьируют в диапазоне 3,2...3,7 % от доли запечатанных покрытий, а в случае с расчетами для дождей $P = 1$ — от 13,2 до 15,3 %¹⁵. Однако, при таком сравнении следует принимать во внимание климатические различия, сказывающихся на объеме дождевых осадков.

Таблица 3

**Расчеты снижения расходов при устройстве дождевых садов
для объекта исследования**

Характеристика расчета	Дворовые территории	Общественно-деловая зона	Зеленые насаждения	Образовательные и дошкольные учреждения	Дворовые территории	Общественно-деловая зона	Зеленые насаждения	Образовательные учреждения
	Дождь $P = 0,1$ год				Дождь $P = 1$ год			
Расчетный объем стока с территории, м ³	1928,2	511,0	503,5	494,5	7978,8	2114,6	2083,3	2046,1
Общая площадь дождевых садов $S_{дс}$, м ²	6427,3	1703,4	1678,2	1648,2	26595	7048,6	6944,2	6820,2
$S_{дс} / S_{вдсбр}$, %	1,5	1,3	0,6	1,3	6,4	5,4	2,5	5,4
Z_{mid}	0,201	0,176	0,094	0,169	0,213	0,185	0,098	0,178
$S_{вдсбр}$ на типовой ДС, м ²	1951,6	2288,2	4906,1	2318,3	471,6	553,0	1185,6	560,3
Длина водосборных лотков l_{can} , м	62,3	67,4	98,8	67,9	30,6	33,2	48,6	33,4
Время добегаания t_i при скорости $V = 0,7$ м/с	3,9	4,0	5,0	4,0	2,9	3,0	3,5	3,0
Расчетный расход Q_i , л/с, при $P = 1$ год	40,2	39,9	39,0	38,8	12,0	12,0	12,4	11,7
Расход фильтрата ДС $Q_{др}$, л/с	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Время наполнения ДС $t_{зап}$, мин	3,1	2,8	1,7	3,2	769,8	705,6	424,3	781,0
Расход перелива ДС $Q_{пер}$, л/с	47,2	51,8	88,6	46,5	0,2	0,2	0,3	0,2
Суммарный расход после ДС $Q_{дс} = Q_{пер} + Q_{др}$, л/с	49,7	54,3	91,1	49,0	2,7	2,7	2,8	2,7
Сокращение расчетного расходов* $Q_{пер}$, %	0	0	0	0	77,7	77,6	77,1	77,1

Примечание. *В случае, если расчетное время заполнения дождевого сада меньше времени добегаания поверхностного стока, расчетный расход определяется для времени добегаания поверхностного стока до расчетного участка (дождевого сада).

¹⁵ West Virginia Stormwater Management and Design Guidance Manual / ed. Wilkins S. 2012. URL: <http://www.dep.wv.gov/WWE/Programs/stormwater/MS4/Pages/default.aspx> Accessed: 26.11.2023.

Estimates of cost reductions for rain gardens for the study site

Calculation characteristic	Yard territories	Public and business area	Green spaces	Educational and preschool institutions	Yard territories	Public and business area	Green spaces	Educational institutions
	Rain $P = 0.1$ year				Rain $P = 1$ year			
Estimated volume of runoff from the territory, m^3	1928.2	511.0	503.5	494.5	7978.8	2114.6	2083.3	2046.1
The total area of rain gardens	6427.3	1703.4	1678.2	1648.2	26595	7048.6	6944.2	6820.2
$S_{rg}/S_{catch.area}$, %	1.5	1.3	0.6	1.3	6.4	5.4	2.5	5.4
Z_{mid}	0.201	0.176	0.094	0.169	0.213	0.185	0.098	0.178
$S_{catch.area}$ on a typical RG, m^2	1951.6	2288.2	4906.1	2318.3	471.6	553.0	1185.6	560.3
Length of catchment trays l_{can} , m	62.3	67.4	98.8	67.9	30.6	33.2	48.6	33.4
Running time t_r at speed $V = 0.7$ m/s	3.9	4.0	5.0	4.0	2.9	3.0	3.5	3.0
Estimated consumption Q_r , L/s, at $P = 1$ year	40.2	39.9	39.0	38.8	12.0	12.0	12.4	11.7
The consumption of the RG filtrate Q_{dr} , L/s	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Filling time of the RG t_{fil} , min	3.1	2.8	1.7	3.2	769.8	705.6	424.3	781.0
RG overflow flow rate Q_{ov} , L/s	47.2	51.8	88.6	46.5	0.2	0.2	0.3	0.2
Total consumption after RG $Q_{RG} = Q_{ov} + Q_{dr}$, L/s	49.7	54.3	91.1	49.0	2.7	2.7	2.8	2.7
Reduction of estimated expenses* Q_{ov} , %	0	0	0	0	77.7	77.6	77.1	77.1

Note. *If the estimated time for filling the rain garden is less than the time it takes for the surface runoff to reach, the estimated flow rate is determined for the time it takes for the surface runoff to reach the calculated area (rain garden).

На заключительном этапе анализа был выполнен расчет снижения пиковых расходов при отношении площадей дождевых садов к площади водосбора в диапазоне 1,5...5,0 %. Расчеты показали, что для функциональных зон с преобладанием непроницаемых и слабопроницаемых покрытий при увеличении площади дождевых садов от 1,5 до 5 % от водосборной территории наблюдается снижение расчетных расходов поверхностного стока от 0 до 78 %. При этом наибольшее снижение расходов поверхностного стока наблюдается при увеличении площади дождевых садов с 1,5 до 3 % от площади водосбора, а дальнейшее увеличение дает незначительный прирост к эффекту (рис. 6).

Для зоны зеленых насаждений с преобладанием проницаемых покрытий размер дождевых садов более 2 % от площади водосбора является избыточным и приводит к снижению величины относительного сокращения расходов стока. Это обусловлено увеличением времени заполнения «чаши» и снижением расхода перелива практически до нуля по мере снижения площади водосбора, приходящейся на дождевой сад. При этом максимальный расход фильтрата, определяемый абсолютной площадью дождевого сада и пропускной способностью фильтрующей

загрузки, остается неизменным и обеспечивает основной вклад в величину расчетного расхода стока после регулирования. Полученные результаты по оптимальным расчетным площадям дождевых садов соответствуют диапазону рекомендуемой доли дождевых садов в Северном климате, которая по оценке шведских экспертов соответствует от 1 до 5 %¹⁶.

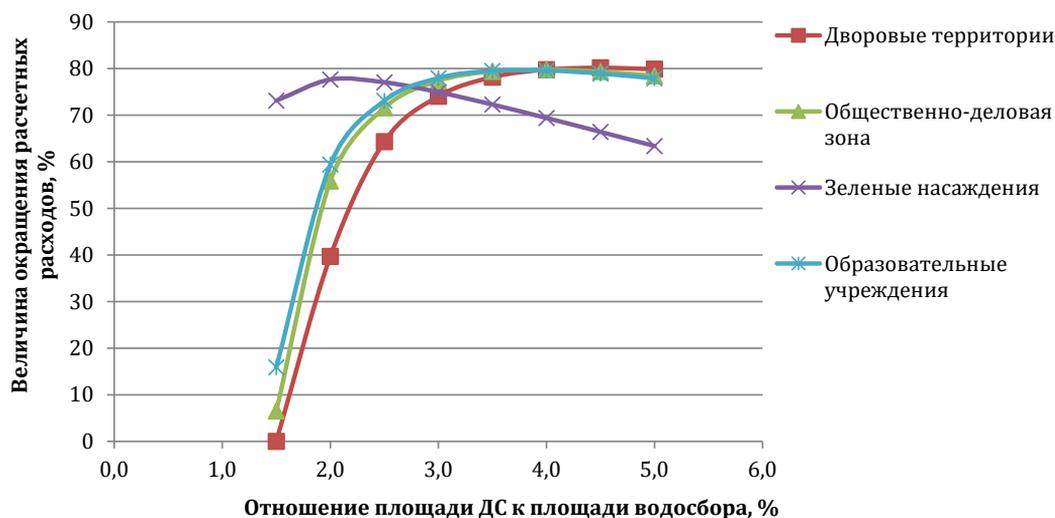


Рис. 6. Снижение пиковых расходов ливневых вод для различных функциональных зон на объекте исследования

Источник: выполнил И.С. Щукин

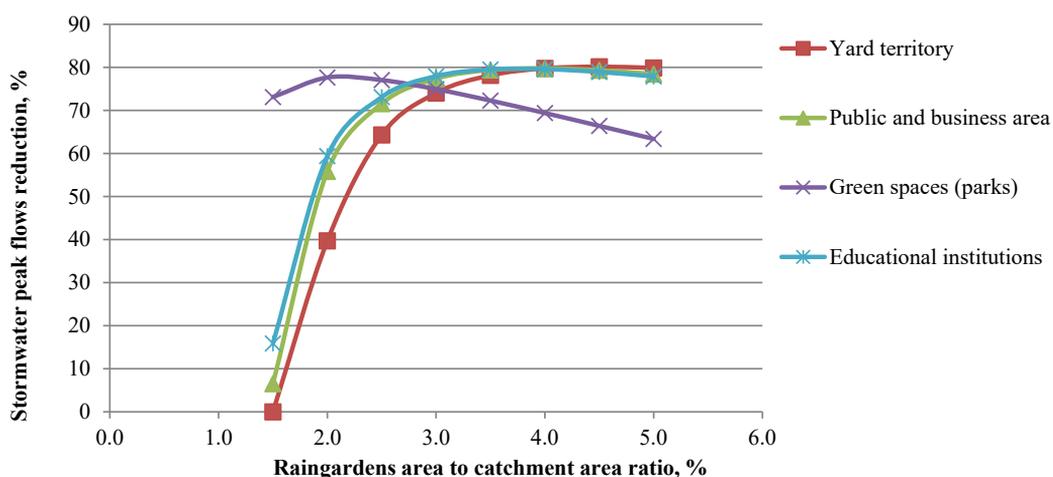


Fig. 6. Stormwater peak flows reduction for various functional areas at the study site

Source: created by I.S. Shchukin

¹⁶ Raingardens for stormwater management – potential of raingardens in a Nordic climate / eds. T. Robinson, H. Schulte-Herbrüggen, J. Mácsik, J. Andersson. 2019. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1370826/FULLTEXT01.pdf> Accessed: 26.11.2023.

Заключение

Объекты водно-зеленой инфраструктуры играют значимую роль в повышении комфортности жителей города. В нашей работе были использованы методы пространственного анализа и расчетные алгоритмы для оценки эффективности применения дождевых садов в целях снижения поверхностного стока в проектируемом жилищном комплексе Москвы.

Пространственный анализ позволил выявить зоны с неблагоприятным уклоном для поверхностного стока (21,6 % площади), где есть риски образования луж, застоя поверхностного стока и заболачивания участков озеленения. Вместе с тем оценка типов водосборов показала, что около 50 % открытых типов поверхности, включая как парки, так и внутри- и межквартальное озеленение, имеют высокий потенциал для применения дождевых садов в качестве инструмента по снижению подтопления.

Расчетная часть работы показала, что наибольшее снижение расходов поверхностного стока наблюдается при увеличении площади дождевых садов с 1,5 до 3 % от площади водосбора для дворовых, общественно-деловых и образовательных зон. А в зоне озеленения нецелесообразно размещение дождевых садов на площади свыше 2 % от общей площади водосбора.

Подобная комбинация пространственных и расчетных методов моделирования позволит оптимизировать проектирование локальных водно-зеленых решений, с одной стороны, подбирая наилучшие зоны размещения, с другой стороны, позволяя избежать «перерасхода» площадей водно-зеленых решений. Важно отметить, что стоит избегать не только недостаточной, но и избыточной площади дождевых садов, так как последнее может привести к пересыханию или потере функциональности пространства.

Список литературы

1. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. Pörtner H.-O., Roberts D., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., Rama-Phd B., Belling D., Dieck W., Götze S., Kersher T., Mangele P., Maus B., Mühle A., & Weyer N. 2022. doi: 10.1017/9781009325844
2. The Sustainable Development Goals and COVID-19. Sustainable Development Report 2020 / eds. Sachs J., Schmidt-Traub G., Kroll C., Lafortune G., Fuller G., Woelm F. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
3. The Decade of Action for the Sustainable Development Goals: Sustainable Development Report 2021 / eds. Sachs J., Kroll C., Lafortune G., Fuller G., Woelm F. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
4. Соколов Ю.И. Риски экстремальных погодных явлений // Проблемы анализа риска. 2018. № 15 (3). С. 6–21. doi: 10.32686/1812–5220–2018–15–3–6–21
5. Maniquiz-Redillas M.C., Kim L.H. Evaluation of the capability of low-impact development practices for the removal of heavy metal from urban stormwater runoff // Environmental technology. 2016. № 37 (18). P. 2265–2272. doi: 10.1080/09593330.2016.1147610
6. Johansson G., Fedje K.K., Modin O., Haeger-Eugensson M., Uhl W., Andersson-Sköld Y., Strömvall A.-M. Removal and release of microplastics and other environmental pollutants during the start-up of bioretention filters treating stormwater // Journal of Hazardous Materials. 2024. № 468. P. 133532. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.133532
7. Чечевичкин В.Н., Ватин Н.И. Особенности состава и очистки поверхностного стока крупных городов // Инженерно-строительный журнал. 2014. Т. 50. № 6. С. 67–74.

8. Nikolaeva O., Rozanova M., Karpukhin M. Distribution of traffic-related contaminants in urban topsoils across a highway in Moscow // *Journal of Soils and Sediments*. 2017. Vol. 17. № 4. P. 1045–1053. doi: 10.1007/s11368-016-1587-y
9. Romzaykina O.N., Vasenev V.I., Paltseva A., Kuzyakov Y.V., Neaman A., Dovletyarova E.A. Assessing and mapping urban soils as geochemical barriers for contamination by heavy metal(loid)s in Moscow megapolis // *J. Environ. Qual.* 2021. Vol. 50. P. 22–37. doi: 10.1002/jeq2.20142
10. Алексеев М.И., Шурмин Ю.Л. Динамика и прогноз водопотребления и водоотведения субъектов РФ // *Труды ВГИ*. 2010. № 2 (23). С. 139–143.
11. Рабинский М.А., Душко А.О., Мирончик Г.М., Жиров Е.Н. Очистка хозяйственно-бытовых и дождевых сточных вод в Российской Федерации: проблемы и пути решения // *Инженерные системы*. 2012. № 2. С. 16–20.
12. Касаткин А.В. Разработка метода очистки поверхностного стока с проезжей части автомобильных дорог: дис. ... канд. тех. наук. М., 2006.
13. Osheen M., Singh K.K. Rain Garden — A Solution to Urban Flooding: A Review // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2019. Vol. 30. P. 27–35. doi: 10.1007/978-981-13-6717-5_4
14. Davis A.P., Hunt W.F., Traver R.G., Clar M.L. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs // *Journal of Environmental Engineering*. 2009. № 135. P. 109–117.
15. Низовцев В.А., Кочуров Б.И., Эрман Н.М., Мироненко И.В., Логунова Ю.В., Костовска С.К., Ивашкина И.В., Родина В.О. Ландшафтно-экологические исследования Москвы для обоснования территориального планирования города: монография. М.: Прометей, 2020. 342 с.
16. Dvornikov Y.A., Grigorieva V.E., Varentsov M.I., Vasenev V.I. Optimal spectral index and threshold applied to Sentinel-2 data for extracting impervious surface: Verification across latitudes, growing seasons, approaches, and comparison to global datasets // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. № 123. 103470. doi: 10.1016/j.jag.2023.103470

References

1. Pörtner HO, Roberts D, Tignor M, Poloczanska E, Mintenbeck K, Alegría A, et al. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2022. doi: 10.1017/9781009325844
2. Sachs J, Schmidt-Traub G, Kroll C, Lafortune G, Fuller G, Woelm F. (eds.) *The Sustainable Development Goals and COVID-19. Sustainable Development Report 2020*. Cambridge: Cambridge University Press; 2020.
3. Sachs J, Kroll C, Lafortune G, Fuller G, Woelm F. (eds.) *The Decade of Action for the Sustainable Development Goals: Sustainable Development Report 2021*. Cambridge: Cambridge University Press; 2021.
4. Sokolov YI. Risks of extreme weather events. *Issues of Risk Analysis*. 2018;15(3):6–21. (In Russ.). doi: 10.32686/1812-5220-2018-15-3-6-21
5. Maniquiz-Redillas MC, Kim LH. Evaluation of the capability of low-impact development practices for the removal of heavy metal from urban stormwater runoff. *Environmental technology*. 2016;37(18):2265–2272. doi: 10.1080/09593330.2016.1147610
6. Johansson G, Fedje KK, Modin O, Haeger-Eugensson M, Uhl W, Andersson-Sköld Y, et al. Removal and release of microplastics and other environmental pollutants during the start-up of bioretention filters treating stormwater. *Journal of Hazardous Materials*. 2024;468:133532. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.133532
7. Chechevichkin VN, Vatin NI. Specifics of surface runoff contents and treatment in large cities. *Magazine of Civil Engineering*. 2014;(6):67–74. (In Russ.). doi: 10.5862/MCE.50.7
8. Nikolaeva O, Rozanova M, Karpukhin M. Distribution of traffic-related contaminants in urban topsoils across a highway in Moscow. *Journal of Soils and Sediments*. 2017;17:1045–1053. doi: 10.1007/s11368-016-1587-y
9. Romzaykina ON, Vasenev VI, Paltseva A, Kuzyakov YV, Neaman A, Dovletyarova EA. Assessing and mapping urban soils as geochemical barriers for contamination by heavy metal(loid)s in Moscow megapolis. *J Environ Qual*. 2021;50(1):22–37. doi: 10.1002/jeq2.20142
10. Alekseev MI, Shurmin YL. Dynamics and forecast of water consumption and water removal in subjects of the Russian Federation. *Bulletin of Civil Engineers*. 2010;(2):139–143. (In Russ.).
11. Rabinsky MA, Dushko AO, Mironchik GM, Zhiron EN. Treatment of domestic and rainwater in the Russian Federation: problems and solutions. *Inzhenernye sistemy*. 2012;(2):16–20. (In Russ.).
12. Kasatkin AV. *Razrabotka metoda ochistki poverkhnostnogo stoka s proezzhei chasti avtomobil'nykh dorog* [Development of a method for cleaning the surface runoff from the roadway of highways]. Moscow; 2006. (In Russ.).

13. Osheen M, Singh KK. Rain Garden — A Solution to Urban Flooding: A Review. In: Agnihotri A, Reddy, K., Bansal, A. (eds.) *Sustainable Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 30*. Singapore: Springer, 2019. p.27–35. doi: 10.1007/978–981–13–6717–5_4

14. Davis AP, Hunt WF, Traver RG, Clar ML. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. *Journal of Environmental Engineering*. 2009;135(3):109–117. doi: 10.1061/(ASCE)0733–9372(2009)135:3(109)

15. Nizovtsev VA, Kochurov BI, Erman NM, Mironenko IV, Logunova YV, Kostovska SK, et al. *Landshaftno-ekologicheskie issledovaniya Moskvyy dlya obosnovaniya territorial'nogo planirovaniya goroda* [Landscape-ecological studies of Moscow to substantiate the territorial planning of the city]. Moscow: Prometheus publ.; 2020. (In Russ.).

16. Dvornikov YA, Grigorieva VE, Varentsov MI, Vasenev VI. Optimal spectral index and threshold applied to Sentinel-2 data for extracting impervious surface: Verification across latitudes, growing seasons, approaches, and comparison to global datasets. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023;(123):103470. doi: 10.1016/j.jag.2023.103470

Об авторах:

Ромзайкина Ольга Николаевна — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник научного центра «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений», Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 8, корп. 2; e-mail: romzaykina-on@rudn.ru

ORCID: 0000–0002–8516–2724 SPIN-код: 7679–7207

Бубушян Алина Александровна — ландшафтный архитектор, Ассоциация Гильдия ландшафтных инженеров, Российская Федерация, 127018, г. Москва, ул. Складочная, д. 3, стр. 5, оф. 204; e-mail: info@laenguild.org

Шукин Игорь Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, вентиляции и водоснабжения, водоотведения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614010, Пермь, ул. Куйбышева, д. 109; e-mail: shchukin-is@yandex.ru
ORCID: 0009–0009–0655–9757 SPIN-код: 5096–4351

Васенев Вячеслав Иванович — кандидат биологических наук, PhD, доцент департамента ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 8, корп. 2; e-mail: vasenev_vi@pfur.ru

ORCID: 0000–0003–0286–3021 SPIN-код: 7209–1269

About authors:

Romzaykina Olga Nikolaevna — Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher, Research center “Smart technologies for sustainable development of the urban environment in the global change”, RUDN University, 8 Miklukho-Maklaya st., bldg. 2, Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: romzaykina-on@rudn.ru

ORCID: 0000–0002–8516–2724 SPIN-code: 7679–7207

Bubushyan Alina Aleksandrovna — Landscape Architect, NCO Association Landscape Engineers Guild, 3 Skladochnaya st., bldg. 5, Moscow, 127018, Russian Federation; e-mail: info@laenguild.org

Shchukin Igor Sergeevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Water Supply and sewerage, Perm National Research Polytechnic University, 109 Kuybysheva st., Perm, 614010, Russian Federation; e-mail: shchukin-is@yandex.ru

ORCID: 0009–0009–0655–9757 SPIN-code: 5096–4351

Vasenev Vyacheslav Ivanovich — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, RUDN University, 8 Miklukho-Maklaya st., bldg. 2, Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: vasenev_vi@pfur.ru

ORCID: 0000–0003–0286–3021 SPIN-code: 7209–1269