

Методология внедрения элементов зеленой инфраструктуры в градостроительные решения для управления дождевой водой

Екатерина Андреева

1. Введение

Изменение климата вместе с возрастающей концентрацией людей в городах, экономической активности и инфраструктуры формирует новые вызовы [Hallegatte, Corfee-Morlot, 2011]. Конкурентоспособность городов напрямую зависит от того, как городская политика отвечает на вызовы, связанные с изменением климата. Разрастание городов, увеличение площади городских территорий влияют на гидрологию водосборного бассейна, в результате чего возрастают объем и скорость поверхностного стока, ухудшается инфильтрация [Fletcher et al., 2013]. Увеличение доли непроницаемых покрытий приводит к быстрому накоплению осадков, а также попаданию в сток химикатов, смываемых с дорог, и загрязнению водоемов. Интенсивные дожди становятся причиной затопленных улиц, домов, особенно в городах с устаревшей ливневой канализацией и низкой долей проницаемых поверхностей [Yao et al., 2022].

Андреева Екатерина Сергеевна, преподаватель, Высшая школа урбанистики имени А.А. Высоковского, Факультет городского и регионального развития, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Москва, Российская Федерация.
E-mail: esandreevoy@gmail.com

Изменение климата и рост урбанизации создают новые вызовы для устойчивого развития городов. Конкурентоспособность городов напрямую зависит от того, как городская политика отвечает на вызовы, связанные с изменением климата. Интенсивные дожди становятся причиной затопленных улиц, домов, особенно в городах с устаревшей ливневой канализацией и низкой долей проницаемых поверхностей. В ответ на вызовы, связанные с изменением климата и увеличением количества осадков, в зарубежной практике сформировалась стратегия управления дождевой водой, основанная на имитации естественных гидрологических процессов при помощи строительства зеленой инфраструктуры (ЗИ). В России управление дождевой водой преимущественно осуществляется с помощью серой инфраструктуры, но инициативы по внедрению ЗИ также появляются. В строительных правилах закреплено несколько типов ЗИ, однако при этом отсутствуют нормативы расчетов для их проектирования.

Цель работы – предложить методологию определения мест размещения ЗИ и алгоритм расчета объемов дождевой воды, которые она может принять. Разработанная методология выстраивалась на основе исследований, посвященных развитию политики реализации ЗИ, а также на основе руководств по проектированию ЗИ, применяемых в городах Филадельфии и Лондоне. Разработанная методология позволяет определить возможность ЗИ перехватывать дождевую воду во время наиболее частых ливней с периодом повторяемости в 1 год и в 10 лет, продолжительностью 24 часа.

Методология была апробирована на центральной части Екатеринбурга. Разработаны рекомендации для федерального и муниципального уровней по созданию нормативной базы для развития ЗИ, а также выявлены прямые и косвенные эффекты ее внедрения.

Ключевые слова: зеленая инфраструктура; серая инфраструктура; поверхностный сток; изменение климата; управление дождевой водой; ливневая канализация

Проблема усугубляется с изменением климата: исследователи прогнозируют рост количества осадков и частоты дождей [Schreider et al., 2000]. В российских городах также наблюдается постепенный рост количества выпадающих осадков. По данным Росгидромета, в целом годовые осадки растут на 2,1% за 10 лет; опираясь на прогнозы, рекомендуется обновить нормы проектирования и провести модернизацию системы водоотведения в российских городах [Акентьева и др., 2022].

В российской практике управление дождевой водой осуществляется традиционным способом, с использованием серой инфраструктуры. При этом исследователи отмечают низкую обеспеченность дорог ливневой сетью в городах России [Кашицина, 2021]. Тем не менее управление ливневой водой при помощи серой инфраструктуры сопровождается мерами по увеличению диаметра труб и протяженности сети. Однако такой подход финансово затратен, влияет на качество и объем стока, приводит к потере городских водных ресурсов. Помимо этого, серая инфраструктура, предназначенная для быстрого отвода поверхностных вод, не всегда может справиться с пиковым объемом воды. Поэтому в зарубежной практике разрабатываются альтернативные подходы к управлению дождевой водой.

Наиболее популярная стратегия управления дождевой водой основывается на имитации естественных гидрологических процессов. В зарубежной практике и законодательствах стран можно встретить следующие термины: LID (Low Impact Development: США, Канада), WSUD (Water-Sensitive Urban Design: Австралия, Великобритания, Новая Зеландия), SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems: Великобритания), BMPs (Best Management Practices: США, Канада), CTs (Compensatory Techniques: Франция, Бразилия), GI (Green Infrastructure: США), Sponge city (Китай) и др. Большинство понятий было впервые введено в 1980-х годах, и с тех пор накопился обширный опыт и научная база по имплементации данных подходов в градостроительные решения. Каждый из подходов предлагает собственные принципы, цели и задачи по управлению дождевой водой, однако все они основаны на включении в систему водоотвода элементов зеленой инфраструктуры (далее – ЗИ) для временного накопления осадков и последующего выпуска. Однако неверно противопоставлять между собой серую и зеленую инфраструктуру. Исследователи отмечают, что, несмотря на то что элементы зеленой инфраструктуры можно использовать обособленно от серой, наибольший эффект достигается при их совместном использовании [Abera et al., 2021].

ЗИ постепенно интегрируется в законодательства стран. Так, в 1972 году в США был принят Закон о чистой воде, в 1992 году в Австралии – Стратегия управления качеством воды на национальном уровне, в 2014 году Китаем была принята к реализации концепция города-губки, а Европейским союзом в 1991 году – Директива по очистке городских сточных вод и в 2013 году – Стратегия развития зеленой инфраструктуры [Commission to the European Parliament et al., 2013].

Дискурс относительно применения ЗИ в русскоязычном научном сообществе слабо развит. Наиболее часто термин «зеленая инфраструктура»¹ по своему значению соответствует понятию «экологического каркаса города» [Александровская и др., 2021]. В целом тема среди русскоязычных исследователей ЗИ привлекает ограниченный круг специалистов, в то время как в зарубежных исследованиях ею занимаются представители самых различных направлений, включая социологов,

Цитирование: Андреева Е. С. (2025) Методология внедрения элементов зеленой инфраструктуры в градостроительные решения для управления дождевой водой. *Городские исследования и практики*, 10(2), 109–133. <https://doi.org/10.17323/usp1022025109-133>

1. В данной работе под термином «зеленая инфраструктура» (Green infrastructure, GI) понимаются объекты городского благоустройства, обеспечивающие подход к управлению дождевой водой, основанный на использовании почвы, растительности, с целью улучшения и/или имитации процесса естественного гидрологического цикла инфильтрации, эвапотранспирации и повторного использования [U.S. Environmental Protection Agency, 2008].

экономистов, городских планировщиков, экологов, государственных управленцев и др.

На законодательном уровне в РФ периодически возникают инициативы по внедрению элементов ЗИ в систему водоотведения. Так, например, в Приказе Минстроя от 29.12.2021 № 1042/пр в п. 18.8 содержится рекомендация по внедрению дождевых садов [Министерство строительства..., 2021]. А в 2019 году Минстрой опубликовал методичку с описанием элементов ЗИ [Методические рекомендации, 2019]. Однако данные инициативы не основаны на системном подходе; более того, отсутствует законодательная база для осуществления данных решений.

Цель данной работы – предложить методологию определения потенциальных мест размещения зеленой инфраструктуры в городе, а также разработать алгоритм расчета количества дождевой воды, которую может принять на себя ЗИ. Разработанная методология выстраивалась на основе исследований, посвященных развитию политики реализации ЗИ, а также с использованием руководств по проектированию ЗИ, применяемых в городах Филадельфии и Лондоне.

2. Методология определения потенциальных мест размещения зеленой инфраструктуры в городской среде, алгоритм расчета количества дождевой воды

2.1. Допущения и алгоритм разрабатываемой методологии

В предлагаемой методологии будет рассматриваться режим работы ЗИ для осуществления перехвата осадков от частых дождей: событий, происходящих с периодом повторяемости в 1 год и в 10 лет. Также в данной методологии будут использоваться доступные методы расчетов из СП 32.13330, в частности формула расчета объема поверхностного стока, который следует очистить:

$$W_{\text{оч}} = 10h_a \Psi_{\text{mid}} F \quad (1),$$

где h_a – максимальный суточный слой осадков, который полностью должен подвергаться очистке (мм), Ψ_{mid} – средний коэффициент стока, значение которого варьируется в зависимости от типа покрытия, F – площадь, с которой образуется сток (га).

В расчетах будет учитываться разная интенсивность ливней в зависимости от продолжительности их выпадения: от 20 минут до 24 часов. Значение интенсивности предлагается рассчитать по формуле, используемой в справочнике А. М. Курганова. Однако ее следует актуализировать либо определить интенсивность ливней для каждого муниципального образования на основе данных многолетних наблюдений или моделирования. Значение интенсивности ливня для продолжительности в 20 минут с разным периодом повторяемости будет также взято из справочника А. М. Курганова [Курганов, 1984].

В расчетах не будут вводиться поправочные коэффициенты на изменение климата в 50-летней перспективе, так как для их определения следует провести дополнительное исследование.

Также в данной методике не будет учтено проектирование системы перелива и процесс эвапотранспирации, так как объем поверхностного стока, удаляемый при помощи эвапотранспирации, будет относительно небольшим. Также мы рассматриваем режим работы ЗИ во время частых ливней, в таком режиме ЗИ должна справляться с объемом поверхностного стока без перелива. Однако система перелива должна быть учтена при расчетах события в 100 лет.

В расчетах будет учитываться коэффициент на дальнейшее развитие городской среды, равный 10%, а также коэффициент запаса фильтрации, равный 1,5. Предполагается, что количество непроницаемых покрытий со временем будет увеличено на 10%. Однако значение коэффициента на дальнейшее развитие городской среды может быть градуировано в зависимости от территории: для территорий новой разработки (greenfield) коэффициент может быть выше, для территорий уже разработанных (brownfield) – ниже. Для уточнения коэффициента запаса фильтрации также следует проводить дополнительное исследование.

Помимо этого, мы рассматриваем в качестве основной функции ЗИ способность удерживать осадки. Несмотря на важность функции транспортировки осадков, которую могут выполнять некоторые типы ЗИ, нас интересует в большей степени объем накопления осадков. Поэтому среди разных типов ЗИ для методологии были выбраны типы ЗИ, способные накапливать осадки. Всего 8 типов: инфильтрационные траншеи, сухие свалы, дождевые сады, пористое мощение, водно-болотные угодья,

Табл. 1. Технические критерии, ограничивающие возможности размещения ЗИ на территории

Источник: составлено автором.

Оценка критерия		Наименее подходящие условия	Средние условия	Подходящие условия
		0	0,5	1
		—	—	—
1	Уклон рельефа	Более 10%	5–10%	0–5%
2	Уровень грунтовых вод	Менее 1 м	1–1,5 м	Более 1,5 м
3	Расстояние до инженерных сетей	Менее указанного значения	-	2 м, 1,5 м или 0,4 м — зависит от типа сетей [Министерство строительства..., 2016]
4	Расстояние от фундаментов зданий и сооружений	Менее 4 м	-	Более 4 м
5	Наличие деревьев	Густо посаженные деревья	Разряженная посадка	Отсутствуют либо редко посажены
6	Категория загрязнения почв [ГОСТ 17.4.3.06-2020 от 01.01.2022]	Опасная, чрезвычайно опасная	Умеренно опасная	Допустимая
7	Категория опасности участка в карстово-суффозионном отношении [СП 22.13330.2016]	Опасная	Потенциально опасная	Неопасная
8	Близость к проездам и улицам для легкости обслуживания (7 м от оси проезда)	Нет, отсутствует возможность организовать проезд	Нет, но есть возможность организовать проезд	Да
9	Наличие пространства для размещения ЗИ	Пространство для размещения ЗИ отсутствует	-	Озелененные участки размером более 1 х 1 м Ширина тротуара на 1 м превышает минимально указанную ширину в СП 42.13330.2016, в таблицах 11.2, 11.2а, 11.4, а также расчетную ширину, указанную в СП 396.1325800.2018 Пешеходные дорожки с низким уровнем интенсивности — 600 чел./ч [СП 396.1325800.2018] Плоскостные парковки Площади
Сумма оценки		0	3–8,5	9

резервуары накопления, конструкции для деревьев, полосы фильтров, совмещенные с дренажными фильтрами.

Предлагаемая методология состоит из пяти шагов:

1. Определение возможности для размещения ЗИ.
2. Проведение детального анализа для размещения подходящих типов ЗИ.
3. Расчет матрицы объема дождевой воды, которую необходимо удерживать в ЗИ во время событий с повторяемостью в 1 год и в 10 лет и продолжительностью от 20 минут до 24 часов.
4. Расчет вместимости ЗИ.

5. Сравнение полученных расчетов.

2.2. Определение возможностей для размещения зеленой инфраструктуры

Возможности размещения ЗИ на территории в первую очередь ограничиваются характеристиками самой территории. В качестве первого шага следует учесть ограничения, накладываемые техническими критериями (табл. 1). Для этого предлагается разделить территорию города или района на три зоны, в зависимости от выполняемых условий: подходящие для размещения ЗИ — соблюдаются все технические критерии; средние — территории,

Таблица 2. Градостроительные критерии, ограничивающие возможности размещения ЗИ на территории

Источник: составлено автором.

Оценка критерия		Наличие ограничений	Отсутствие ограничений
		0	1
		—	—
1	Наличие особо охраняемых природных территорий	Да	Нет
2	Территории ОКН, зоны охраны ОКН, защитные зоны ОКН, территории объекта археологического наследия, достопримечательного места [73-ФЗ]	Да	Нет
3	Наличие санитарно-защитных зон	Да	Нет
4	Тип собственности	Частная собственность	Муниципальная или государственная собственность
Сумма оценки		0-3	4

Таблица 3. Оценка приоритетности развития ЗИ

Источник: составлено автором.

Оценка критерия		Отсутствие приоритета	Наличие приоритета	Вес
		0	1	
		—	—	
1	Наблюдаемые случаи подтопления во время ливней	Нет	Да	0,4
2	Риск подтопления по данным моделей во время ливней	Отсутствует	Высокий	0,3
3	Территории приоритетного развития	Нет	Да	0,2
4	Запланировано строительство, реконструкция, капитальный ремонт улиц, общественных пространств, дворов, территорий дошкольных и общеобразовательных учреждений, запланирован ремонт или замена инженерных сетей	Территория находится на гарантии у подрядчика	Да	0,1
Сумма оценки		0	1	1

на которых возможно размещение ЗИ, однако следует принимать решение о строительстве ЗИ в индивидуальном порядке; наименее подходящие – территории, которые не соответствуют критериям.

Если территория соответствует критерию с подходящими условиями, ей присваивается значение 1; если средним условиям – 0,5; если не соответствует условиям – 0. Важно одновременное выполнение всех условий для определения территории как подходящей для размещения ЗИ, то есть такие территории по сумме баллов будут иметь оценку 9 (табл. 1). Если хотя бы один из критериев не выполняется, то есть оценка критерия – 0, то данную территорию следует отнести к наименее подходящим. Если выполняются только средние условия или часть критериев из средних и подходящих условий, то территорию следует отнести к средним условиям.

Уклон рельефа, уровень грунтовых вод, расстояние до инженерных сетей и фундаментов зданий, наличие загрязнений почв и карста, а также возможности подъезда играют важную роль при выборе разме-

щения ЗИ. Практически все типы ЗИ возможно разместить на уклоне 0–5%, при уклоне 5–10% размещение возможно при условии осуществления контроля скорости стока через строительство дамб либо при помощи террасирования. При уклоне более 10% предлагается считать размещение ЗИ невозможным [Frontiera et al., 2014].

Размещение ЗИ предлагается считать возможным при уровне грунтовых вод более 1,5 м. При уровне 1–1,5 м следует насыпать территории или закладывать неглубокие типы ЗИ. Значение в 1 м и менее предлагается считать неподходящим для размещения ЗИ.

Информацию по допустимому расстоянию до инженерных сетей следует брать в соответствии с СП 42.13330.2016 [Министерство строительства..., 2016b]. Расстояние от фундаментов зданий предлагается принимать в соответствии с исследованиями [Jiménez Ariza et al., 2019; Kuller et al., 2019].

Если на территории отсутствует возможность подъезда, то следует оценить возможность его обеспечения. Помимо этого, следует оценить территорию на на-

Критерии	Тип ЗИ		Инфильтрационные траншеи (Infiltration trench)	Полосы фильтров (filter strips) (ПФ) + дренажные фильтры (ДФ) (filter drains)		Сухие свалы ¹ (dry swale)	Дождевые сады (rain gardens)	Пористое мощение (permeable paving)	Резервуары накопления ¹ (detention basins)	Водно-болотные угодья (wetlands)	Конструкции для деревьев (trees) (далее – Деревья)
	Ед. изм.										
Обязательные критерии											
Минимальная площадь ЗИ [Jiménez Ariza et al., 2019; CIRIA, 2015; Uribe-Aguado et al., 2022]	м²	15	-	-	15	1	1	1	45	160	2,2
Максимальная площадь ЗИ [CIRIA, 2015]	м²	-	-	-	-	800	-	-	-	13 000	-
Минимальная длина [Uribe-Aguado et al., 2022]	м	30	5	5	30	1	1	1	9	20	1,5
Максимальная длина [CIRIA, 2015]	м	-	-	-	-	22	-	-	-	-	-
Минимальная ширина [Uribe-Aguado et al., 2022]	м	0,5	-	-	0,5	1	1	1	5	8	1,5
Максимальная ширина [CIRIA, 2015]	м	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
Пропорция длины к ширине [CIRIA, 2015]		-	-	-	-	-	-	-	от 3:1 до 5:1	2:1	-
Минимальная глубина [CIRIA, 2015]	м	0,5	1 – ДФ	1 – ДФ	0,4	0,4	0,4	0,4	-	0,6–1	0,94
Максимальная глубина [CIRIA, 2015]	м	-	2 – ДФ	2 – ДФ	-	-	-	-	2	1,2–2	-
Максимальное отношение площади непроницаемой поверхности к площади проницаемой [Chapter 3. 3.2. Stormwater Management Design]		10:1	10:1	10:1	16:1	16:1	16:1	2:1 [CIRIA, 2015], 4:1 [Thévenot D.R., 2008]	16:1 – при наличии озеленения, 10:1 – при отсутствии	16:1	16:1
Уклон [Roberts S. et al., 2017]	%	1–5	1–5	1–5	0–5	0–5	0–5	0–5	0–3	0–3	0–5
Мин. коэффициент фильтрации [CIRIA, 2015]	мм/ч	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	0	3,6
Рекомендуемый коэффициент фильтрации [Jiménez Ariza et al., 2019]	мм/ч	7	13	13	13	7	7	13	7	-	7

Таблица 4. Основные характеристики выбранных типов ЗИ

Источник: составлено автором.

1. Размеры указаны для основания.

Критерии	Тип ЗИ	Ед. изм.	Инфильтрационные траншеи (Infiltration trench)	Полосы фильтров (filter strips) (ПФ) + дренажные фильтры (ДФ) (filter drains)	Сухие свалы ¹ (dry swale)	Дождевые сады (rain gardens)	Пористое мощение (permeable paving)	Резервуары накопления ¹ (detention basins)	Водно-болотные угодья (wetlands)	Конструкции для деревьев (trees) (далее – Деревья)
Минимальное расстояние от фундаментов зданий и сооружений [Kuller et al., 2019]		м	4	4	4	0 – если облицованы, 5 – если облицовки нет	4	4	10	4
Рекомендуемые критерии										
Разрешенная скорость движения на улице [Ibidem]		км/ч	-	-	50–110	10–50	-	-	-	-
Неподходящее место размещения [Jiménez Ariza et al., 2019; Kuller et al., 2019; CIRIA, 2015]		-	-	Парки, общественные пространства, в условиях плотной застройки	В условиях плотной застройки	Вдоль УДС с интенсивным движением	-	В условиях плотной застройки	В условиях плотной застройки	-
Подходящее место размещения [Ibidem]		-	Разделители полосы движения, вдоль УДС, на территориях объектов образования, здравоохранения, в условиях высокой плотности	Вдоль УДС, парковок, в границах производственных территорий	Вдоль УДС, парковок, на месте разделителей дорожного движения, рядом с территориями жилой застройки	Парки, общественные пространства, вдоль улиц местного значения, проездов, пешеходных улиц, рядом с объектами общественно-деловой застройки и жилой	Площади, тротуары, парковки, в условиях плотной застройки, рядом с коммерческими объектами	Парки, общественные пространства, перекрестки с круговым движением, объекты образования и здравоохранения	Парки, общественные пространства, школы, дошкольные учреждения, объекты здравоохранения, рядом с общественно-деловой застройкой и жилой	Вдоль УДС, парки, общественные пространства, в условиях плотной застройки

Таблица 4. Основные характеристики выбранных типов ЗИ

Источник: составлено автором.

личие свободного пространства для размещения ЗИ. В первую очередь следует определить территории, имеющие большие участки непроницаемого покрытия, такие как площади и плоскостные парковки. Необходимо проверить возможность размещения ЗИ вдоль тротуаров. Следует также определить тротуары с низкой интенсивностью движения, так как такие тротуары также подойдут для укладки пористого покрытия. Дополнительно нужно проверить наличие свободного пространства площадью более 1 м², в частности на озелененных территориях (минимальный размер ЗИ равен квадрату со стороной в 1 м; см.: табл. 4).

Если территория характеризуется наличием карста или имеет загрязнения, то инфильтрация на таких территориях должна быть обязательно предотвращена

при помощи гидроизоляции основания и стен ЗИ. В этом случае следует предусмотреть отвод воды из ЗИ при помощи дренажных труб либо использовать типы ЗИ, выполняющие функции транспортировки осадков (обязательно с гидроизоляцией основания и стен), либо типы ЗИ, подходящие для территорий, на которых инфильтрация невозможна. Однако решение относительно размещения ЗИ в условиях карста и наличия загрязнений следует принимать индивидуально для каждой территории.

На следующем шаге предлагаем рассматривать только территории, которые были охарактеризованы как имеющие подходящие условия в соответствии с требованиями технических критериев, так как в данном случае мы считаем важным выявить территории, полностью сво-

Таблица 5. Рейтинг типов ЗИ по приоритетности реализации

Источник: составлено автором.

1	Водно-болотные угодья
2	Резервуары накопления осадков
3	Дождевые сады и конструкции для деревьев
4	Инфильтрационные траншеи
5	Сухие свалы
6	Полосы фильтров + дренажные фильтры
7	Пористые покрытия

бодные от каких-либо ограничений и подходящие в наивысшей степени для реализации ЗИ. Выявленные территории следует проверить на наличие градостроительных ограничений (табл. 2).

Градостроительные критерии учитывают наличие зон с особыми условиями использования территорий, в частности санитарно-защитных зон (СЗЗ), защитных зон и зон охраны ОКН. В зависимости от территории дополнительно могут быть рассмотрены зоны с особыми условиями использования, перечисленные в Земельном кодексе, ст. 105 [Земельный кодекс (ЗК РФ)]. Размещение ЗИ в границах СЗЗ следует рассматривать индивидуально, так как, во-первых, установленная СЗЗ может быть признаком наличия загрязненных грунтов на территории, во-вторых, часто размещение ЗИ совмещается с созданием мест отдыха, что, согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03, запрещено в границах СЗЗ [Федеральная служба по надзору..., 2022]. Размещение ЗИ в границах зон охраны и защитных зон ОКН также должно рассматриваться индивидуально, так как ЗИ может повлиять на зрительное восприятие ОКН либо на сохранность объекта.

Помимо этого, к градостроительным ограничениям предлагаем отнести наличие особо охраняемых природных территорий и учет типа собственности. Размещение ЗИ в границах ООПТ может оказать влияние на сложившиеся природные особенности территории. Также следует в первую очередь планировать размещение ЗИ на территориях, находящихся в муниципальной или государственной собственности².

По каждому градостроительному критерию территории присваивается оценка 1 или 0 в зависимости от выполняемых условий, перечисленных в таблице 2. Территория, у которой отсутствуют ограничения (то есть сумма оценки равна 4), оценивается как наиболее подходящая для размещения ЗИ. Если территория имеет хоть одно ограничение (сумма оценки от 0 до 3), то данную территорию следует оценивать как име-

ющую ограничения и рассматривать индивидуально.

После определения территорий без ограничений следует оценить территории по приоритетности реализации (табл. 3).

В первую очередь следует определить наличие или отсутствие наблюдаемых случаев подтоплений во время ливней. Также следует провести оценку риска подтопления во время ливней по данным моделирования. Помимо этого, необходимо проверить, относится ли территория к территориям приоритетного развития. Под территориями приоритетного развития могут пониматься, например, территории, входящие в водно-зеленый каркас города, а также территории комплексного развития и новой застройки; отдельно нужно посмотреть планы по благоустройству общественных пространств, развития улично-дорожной сети, замене и ремонту инженерных сетей. Дополнительно следует выделить территории, которые находятся на гарантийном обслуживании у подрядчика, – территории, развитие которых в ближайшее время будет ограничено.

При оценке приоритетности предлагаем каждому критерию присваивать веса (табл. 3). При соответствии критерию приоритетности территории присваивается 1, при отсутствии – 0. Далее вес критерия умножается на значение оценки критерия. Значение весов задается в ходе исследования. В зависимости от конкретной ситуации и наличия данных значение весов может быть изменено. В результате выполнения данного шага территории, отнесенные к наиболее подходящим по условиям выполнения технических и градостроительных критериев, будут ранжированы по приоритетности реализации проектов ЗИ.

В результате выполнения первого этапа анализа будут выявлены территории, подходящие для размещения ЗИ, а также определены приоритетные территории для реализации ЗИ.

2.3. Проведение детального анализа для размещения подходящих типов ЗИ

На втором этапе предлагается оценить выявленные территории на предмет соответствия требованиям разных типов ЗИ. Требования к территориям по каждому типу ЗИ собраны в таблице 4. Критерии выбора разных типов ЗИ разделены на обязательные и рекомендуемые.

2. Для территорий, находящихся в частной собственности, целесообразно формировать стимулы для создания ЗИ, например, путем уменьшения платежей за услуги по водоотведению поверхностных стоков, как это делается во многих развитых странах.

Таблица 6. Оценка приоритетности использования типа ЗИ с использованием данных инструмента MCC (Multi-Criteria Comparator) [ADSS: Adaptive Decision Support System; Thévenot, 2008]

Источник: составлено автором.

Критерии		Тип ЗИ									
		Технические критерии									
		Инфильтрационные траншеи	Полосы фильтров	Дренажные фильтры	Сухие свалы	Дождевые сады	Пористые покрытия	Резервуары накопления	Водно-болотные угодья	Весы	
1	Контроль загрязнений, по всем видам: содержание взвешенных веществ, БПК, ХПК, питательных веществ, фекальных колиформы, металлы, ПАУ, гербициды и другие органические загрязнители (5 – высокий, 1 – низкий)	3	2	2	3	2	1	3	5	20	
2	Адаптируемость системы к развитию городской среды (5 – высокая, 1 – низкая)	3	2	1	3	5	1	5	5	10	
3	Контроль наводнений (5 – высокий, 1 – низкий)	3	2	2	2	5	2	5	5	20	
Критерии эксплуатации и обслуживания											
4	Требования к обслуживанию (5 – низкие, 1 – высокие)	4	4	5	3	2	4	3	1	10	
5	Надежность и долговечность (5 – высокая, 1 – низкая)	4	2	2	4	5	1	4	3	10	
6	Стоимость в формате жизненного цикла (5 – низкая, 1 – высокая)	4	4	4	4	5	2	5	4	10	
Социальные критерии											
7	Потенциал устойчивого развития (5 – высокий, 1 – низкий)	2	3	2	3	4	1	4	5	5	
8	Эстетическая и материальная ценность (5 – высокая, 1 – низкая)	2	3	2	3	4	2	4	5	5	
9	Потенциал общественного восприятия (5 – высокое, 1 – низкое)	1	2	1	2	4	0	4	5	5	
10	Риски для здоровья и безопасности населения (5 – высокие, 1 – низкие)	5	5	5	3	1	4	2	1	5	
Общая сумма баллов		320	265	250	295	375	175	400	410	100	

Если к одной территории подходят одновременно несколько типов ЗИ, то следует выбрать тип с наивысшей позицией в рейтинге (табл. 5).

Данный рейтинг был составлен на основе исследования DayWater с использованием инструмента MCC (Multi-Criteria Comparator). Конечно, следует в дальнейшем провести исследования на предмет оценивания разных типов ЗИ и составить собственный рейтинг приоритета реализации разных типов ЗИ. Причем у разных муниципальных образований такие рейтинги могут отличаться друг от друга. В данном случае предлагается использовать технические, социальные и эксплуатационные критерии (табл. 6). Распределение весов было назначено авторами, а сами оценки ЗИ по критериям были взяты из инструмента MCC (Multi-Criteria Comparator) [ADSS: Adaptive Decision Support System; Thévenot, 2008].

Таким образом, на данном этапе оценивается возможность размещения разных

типов ЗИ на территориях, которые на первом этапе были определены как наиболее подходящие. Также из множества возможных типов ЗИ для каждого участка выбирается при помощи рейтинга тот тип ЗИ, который имеет наибольшее количество преимуществ перед другими типами.

2.4. Расчет матрицы объема дождевой воды

На третьем этапе следует рассчитать матрицу объема дождевой воды, которую необходимо удерживать в ЗИ во время событий с повторяемостью в 1 год и в 10 лет и продолжительностью от 20 минут до 24 часов. Для этого необходимо определить площадь территории, с которой каждый тип ЗИ должен собрать поверхностный сток, а также площадь ЗИ. На данном этапе в расчетах нужно брать площадь непроницаемых поверхностей на 10% больше фактической площади, тем самым

будет введена поправка на развитие городской среды.

Требуемый объем дождевой воды для разных событий и продолжительности предлагается рассчитывать по формуле:

$$V = W - V_{\text{инф.}} + V_{\text{ЗИ}} \quad (2),$$

где V – объем воды, который должен быть удержан внутри ЗИ (м^3), W – объем поверхностного стока (м^3), $V_{\text{инф.}}$ – объем воды, который будет инфильтрирован во время дождя (м^3), $V_{\text{ЗИ}}$ – объем воды, выпадающий на поверхности ЗИ (м^3).

1. *Расчет объема поверхностного стока (W), образуемого во время событий с разным периодом повторяемости и продолжительностью от 20 минут до 24 часов.*

Расчет объема поверхностного стока предлагается вычислять по формуле 1. Однако в данной формуле высота осадков берется равной максимальной величине суточного слоя. В СП 32.13330 не указано время, за которое данный суточный слой мог бы выпасть, а без знания продолжительности дождя невозможно рассчитать объем воды, который мог бы за время продолжительности ливня инфильтрироваться. Поэтому правильнее использовать в расчетах вместо значения суточного слоя произведение интенсивности осадков на время их выпадения. В СП 32.13330 не содержится данных по интенсивности осадков, однако в данной методологии предлагается воспользоваться формулой из справочника А.М. Курганова:

$$q = q_{20} \times (20/t)^n \quad (3),$$

где q – расчетная интенсивность дождя (л/с/га), q_{20} – интенсивность дождя продолжительностью 20 минут и средней повторяемости 1 раз в N лет (л/с/га), t – продолжительность ливня (с), n – параметр кривой редукции относительной интенсивности дождя.

В справочнике говорится, что данная формула подходит для расчета интенсивности дождя продолжительностью от 10 до 200 минут, однако правильнее иметь данные по длительности ливня до 24 часов³. Как говорилось ранее, данную формулу следует актуализировать либо со-

брать необходимые данные.

Интенсивность ливня 20-минутной продолжительности для разного времени повторяемости опубликована в справочнике [Курганов, 1984]. Значение n указано в СП 32.13330 и в справочнике А. М. Курганова для разных регионов РФ.

Значение постоянного коэффициента стока предлагается определить по таблице 8 СП 32.13330.

В итоге формула 1 примет вид:

$$W = 10 \times q \times t \times \Psi_{\text{mid}} \times F \quad (4),$$

где W – объем поверхностного стока, собираемый в ЗИ (м^3); q – расчетная интенсивность дождя (мм/ч), которую можно рассчитать по формуле 3, а затем результат перевести в мм/ч ; t – продолжительность ливня (ч), Ψ_{mid} – средний коэффициент стока, F – площадь, с которой образуется сток (га).

2. *Расчет объема дождевой воды, которая будет инфильтрирована во время дождя в грунт.*

Объем дождевой воды, который будет инфильтрирован в грунт, предлагается рассчитать по формуле:

$$V_{\text{инф.}} = k_f \times A_b \times t \quad (5),$$

где $V_{\text{инф.}}$ – объем поглощенной дождевой воды (м^3), t – продолжительность выпадения осадков (ч), A_b – площадь ЗИ (м^2), k_f – коэффициент фильтрации (м/ч).

3. *Расчет объема дождевой воды, который выпадет на поверхности ЗИ.*

Так как ЗИ имеет площадь, то необходимо рассчитать объем дождевой воды, который будет на нее попадать. Формула расчета:

$$V_{\text{ЗИ}} = 0,001 \times A_b \times q \times t \quad (6),$$

где $V_{\text{ЗИ}}$ – объем осадков, образуемый на поверхности ЗИ (м^3), A_b – площадь ЗИ (м^2), q – расчетная интенсивность дождя (мм/ч), t – продолжительность выпадения осадков (ч).

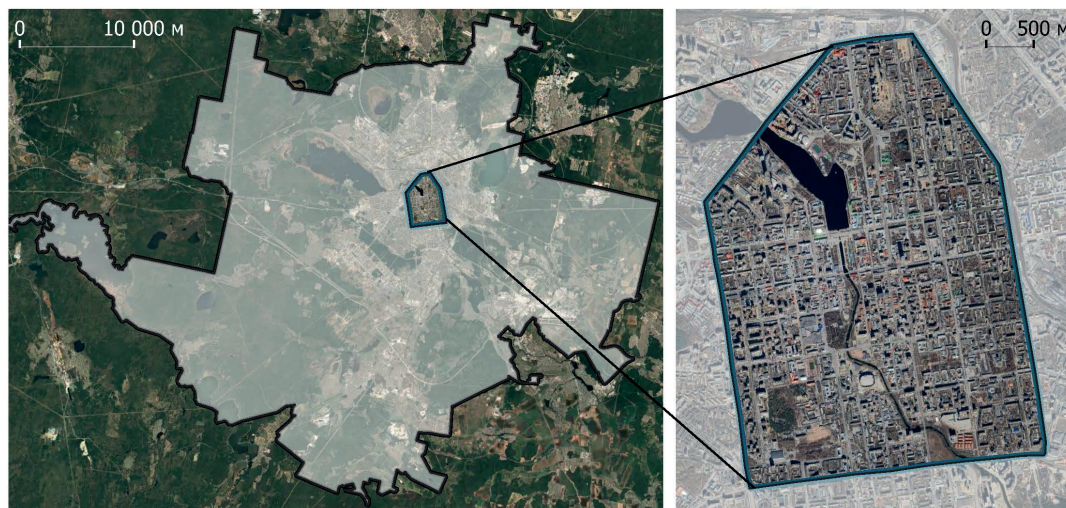
Таким образом, проведя расчеты по формуле 2, получится рассчитать матрицу объема осадков для разной продолжительности ливня с разным значением повторяемости.

3. За неимением других формул и данных, во время апробации для расчета осадков 24-часового ливня будет также использована эта формула. Несмотря на то что данные по интенсивности ливня требуют актуализации и уточнения, в данном случае важнее показать алгоритм расчета.

Таблица 7. Типо-размеры ЗИ
Источник: составлено автором.

	Ед. изм.	Инфильтрационные траншеи	Полосы фильтров + дренажные фильтры	Сухие свалы	Дождевые сады	Пористое покрытие	Резервуары накопления	Водноболотные угодья	Конструкции для деревьев
			Полоса фильтров	Основание			Основание		
Ширина	м	0,5	5	0,5	1	1	5	8	1,5
			Дренажный фильтр	Верх, при уклоне склонов 1:3			Верх, при уклоне склонов 1:3		
			0,5	3,5			11		
Длина	м	30	30	30	1	1	9	20	1,5
			Полоса фильтров	Основание			Основание		
			150	15			45		
Общая площадь	кв. м	15	Дренажный фильтр	В плане	1	1	В плане	160	2,25
			15	105			165		
		Дренажный слой	Дренажный слой	Глубина оврага	Фильтрующий слой	Брусчатка			Почва
						0,08			
Основание	м			0,5	0,9	Подстилающий слой	-	-	1
		1	1	Дренажный слой	Дренажный слой	0,05			Дренажный слой
				0,5	0,2	Дренажный слой			0,5
Минимальный уровень грунтовых вод		2	2	2	2,1	1,48	2	2	2,5
Максимальная высота воды внутри ЗИ	м	1	0,9	0,5	0,9	0,4	1	1	0,5
Минимальная пористость основания		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-	0,3
Коэффициент фильтрации	м/ч	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	0,0036	-	-	0,0036
Коэффициент фильтрации с учетом запаса 1,5	м/ч	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	-	-	0,0024
Общий объем воды	куб м	4,5	4,05	2,25	0,27	0,1	98,72	160	0,34
Требуемое время опустошения до половины	ч	24	24	24	24	24	-	-	24
Время до опустошения наполювину	ч	15,8	15,3	12,5	15,5	21,8	-	-	15,8

Рис. 1. Границы рассматриваемой территории в центральной части г. Екатеринбурга
 Источник: составлено автором, данные OSM.



Территория рассмотрения

2.5. Расчет вместимости ЗИ

На следующем этапе следует оценить вместимость ЗИ, определив максимальный объем дождевой воды, которую может удержать выбранный тип ЗИ. Затем необходимо сравнить объем допустимой вместимости ЗИ с объемом дождевой воды, которую требуется удержать при помощи ЗИ, рассчитанной на третьем этапе в виде матрицы объема осадков для ливней разной продолжительности и повторяемости.

В результате сравнения будет определен стандарт обслуживания ЗИ – событие и продолжительность дождя, во время которого удастся удержать весь необходимый объем дождевой воды. При этом уровень воды должен быть ниже максимально возможного, а значение времени опустошения ЗИ наполовину в результате действия инфильтрации должно быть менее 24 часов.

Для определения максимально возможного объема дождевой воды в ЗИ предлагается использовать формулу:

$$V = Ab \times h \times n \quad (7),$$

где Ab – площадь ЗИ, определенная на третьем этапе (m^2); h – максимально возможный слой осадков внутри ЗИ (m), значение может быть равно высоте дренажного слоя или фильтрующего слоя, в случае с дождевыми садами; n – значение пористости фильтрующего или дренажного материала, минимум – 0,3.

В таблице 7 расчеты произведены авторами для минимально возможных размеров ЗИ, указанных в таблице 4. Также рассчитано время опустошения ЗИ

наполовину с целью проверки возможности опустошения ЗИ наполовину за 24 часа.

Полосы фильтров, в отличие от дренажных фильтров, предназначены для транспортировки дождевой воды, поэтому в данном случае считался объем вместимости дренажного фильтра. В водно-болотных угодьях объем вместимости брался равным общему объему постоянного уровня воды в них.

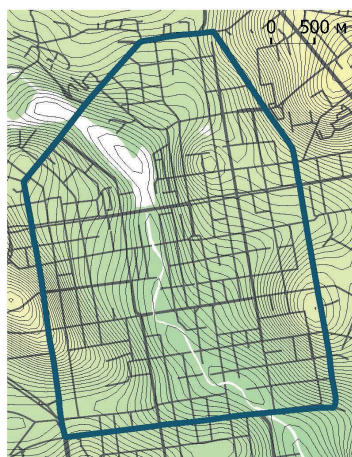
После проведения расчетов и их сравнения на 3-м и 4-м этапах будет определен стандарт обслуживания каждого типа ЗИ. Также станет известно, с какой площади каждый тип ЗИ сможет собрать поверхностный сток, и рассчитана необходимая площадь ЗИ. Помимо этого, будут определены территории, с которых невозможно собрать поверхностный сток в ЗИ, либо выявлен недостаток необходимой площади для ЗИ.

В случае если в границах территорий, определенных как подходящие для размещения ЗИ во время выполнения 1-го и 2-го этапов алгоритма методологии, будет выявлен недостаток свободного места для размещения ЗИ под необходимый стандарт обслуживания, следует рассмотреть дополнительные сценарии управления дождевой водой: 1) создать стимулы для собственников частных земельных участков строить ЗИ; 2) рассмотреть возможность перенаправления излишка поверхностного стока в зоны долговременного хранения, например пруды или подземные резервуары накопления осадков, которые должны быть расположены ниже по рельефу; 3) перенаправить излишки поверхностного стока в централизованную ливневую канализацию.

Рис. 2. Исходные данные для определения мест размещения ЗИ

Источник: составлено автором, источники данных описаны в тексте.

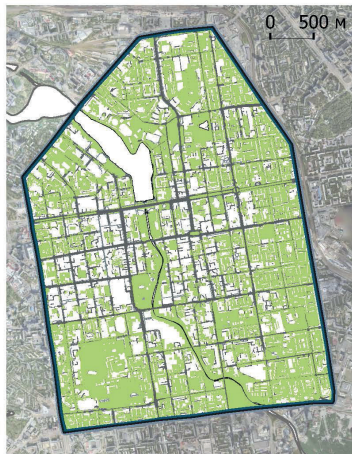
1. Рельеф местности



Шкала высот в метрах

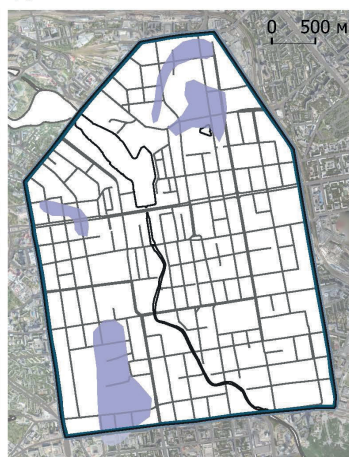


4. Озелененные территории



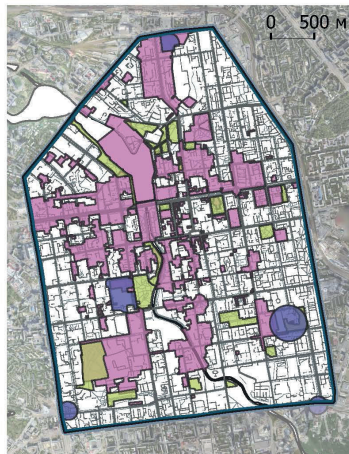
Наличие озеленения на территории

2. Территории с высоким уровнем грунтовых вод



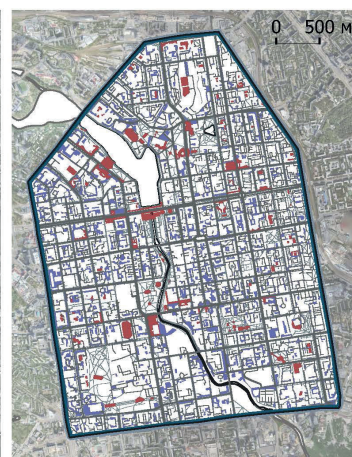
Территории с высоким уровнем грунтовых вод (менее 2 м)

5. Зоны с особыми условиями использования территории



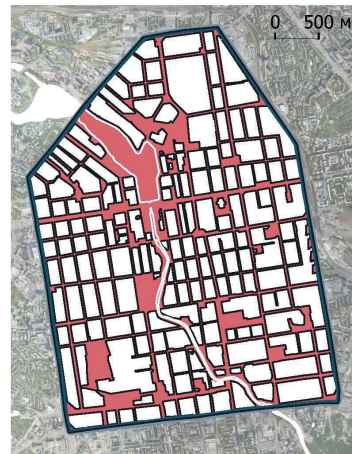
С33 ООПТ
Зоны охраны ОКН и территории ОКН

3. Территории занимаемые парковочными местами и площадями



Парковки Площади
Улично-дорожная сеть, пешеходные связи

6. Территории общего пользования



Территории общего пользования

3. Возможности использования разработанной методологии

3.1. Апробация на примере Екатеринбурга

Для апробации разработанного метода был выбран центр города Екатеринбурга.

Среди исходных данных удалось найти графическую информацию о территориях с высоким уровнем грунтовых вод [Обсуждение нового стандарта благоустройства улиц]. Информация по границам территорий с особыми условиями использования — С33, ООПТ, зоны охраны и территории ОКН — была взята из проекта нового генерального плана, разрабатываемого для Екатеринбурга в настоящее время на период до 2045 года. Границы территорий общего пользования были взяты из информации, содержащейся

на кадастровой карте. Абрис улично-дорожного полотна в пределах границ территорий общего пользования был очерчен вручную, так же как и территории размещения парковок и площадей. Размещение тротуаров, проездов, пешеходных дорожек было взято из OSM. При этом для проездов была назначена общая ширина буферной зоны в 6 м, для тротуаров — 3 м, для пешеходных дорожек — 1,5 м. Для создания схемы озеленения территорий был рассчитан NDVI — нормализованный вегетационный индекс, отобраны территории, имеющие значение индекса больше 0 [NDVI — теория и практика]. Дополнительно из получившегося слоя были исключены наложения с парковками, зданиями, площадями, улично-дорожным полотном, пешеходными дорожками и была добавлена информация по зеленым наса-

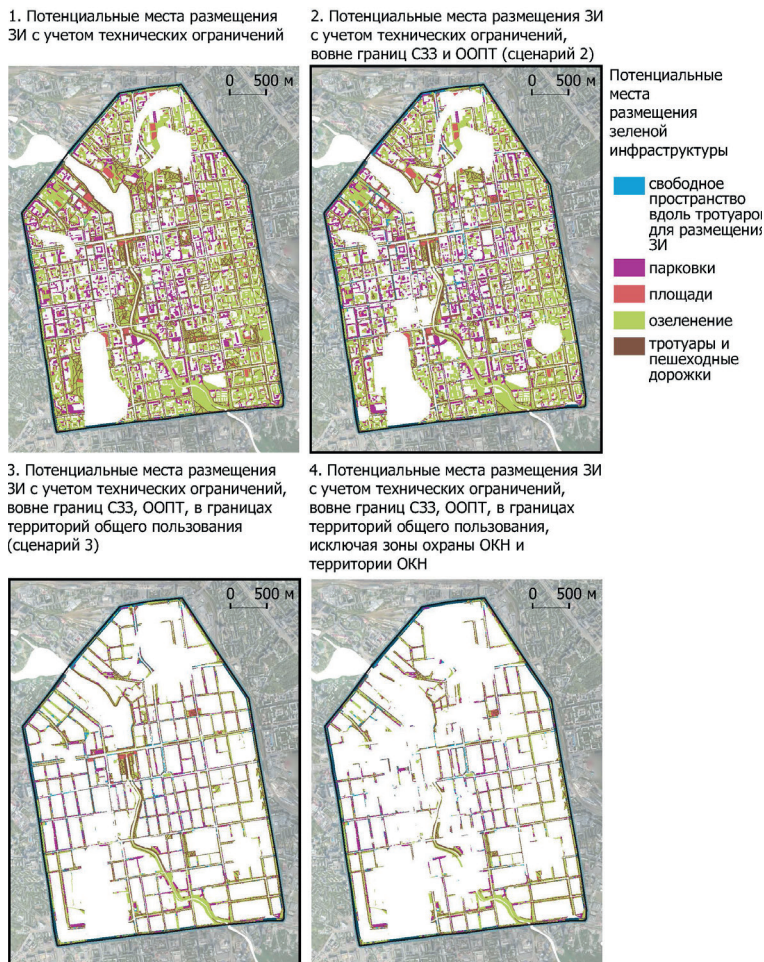


Рис. 3. Потенциальные места размещения ЗИ

Источник: составлено автором.

ждению из OSM. Затем была проведена ручная проверка получившейся информации⁴. Информация по рельефу была также взята по данным спутника – SRTM 30 м.

На следующем этапе были выявлены свободные территории вдоль улично-дорожной сети, не занятые озеленением, парковками, тротуарами, – потенциально свободные для размещения на них ЗИ. Затем были исключены территории с высоким уровнем грунтовых вод, территорий с уклоном более 5% выявлено не было⁵. Также исключены территории, находящиеся в буферной зоне в 4 м от зданий и сооружений. Информацию по другим техническим ограничениям, содержащимся в таблице 1, не удалось найти в открытых источниках. На рис. 3.1 представлены потенциальные места размещения ЗИ с учетом имеющихся данных по техническим

ограничениям. На рис. 3.2 дополнительно исключены территории, попадающие в санитарно-защитные зоны (СЗЗ) и в границы особо охраняемых природных территорий (ООПТ). На рис. 3.3 были исключены территории вне границ общего пользования. А на рис. 3.4 дополнительно исключены территории, попадающие в зоны охраны ОКН и территорий ОКН. Расчеты далее предлагается проводить для потенциальных мест размещения ЗИ, отображенных на рис. 3.2 (сценарий 2) и 3.3 (сценарий 3).

В связи с отсутствием данных этап определения приоритетных территорий для реализации ЗИ и этап детального выбора типа ЗИ были пропущены. Однако предлагается считать, что озелененные территории и территории, отнесенные к свободным, подходят для размещения дождевых садов, а территории парковок, площадей, тротуаров – для организации пористых покрытий (рис. 3).

На следующем этапе необходимо рассчитать матрицу объема дождевой воды, которую требуется удерживать в ЗИ во время событий с повторяемостью в 1 год и в 10 лет и продолжительностью от 20 минут до 24 часов. В первую очередь по формуле 3, опираясь на данные интенсивности дождя 20-минутной продолжительности и средней повторяемости 1 раз в N лет из справочника А. М. Курганова, было рассчитано значение интенсивности ливня (q) разной продолжительности (t) и повторяемости (P), при $n = 0,7$. А затем получившиеся значения были переведены в миллиметры осадков (h) и интенсивность ливня, выраженную в мм/ч (i) (табл. 8). Стандарт обслуживания предлагается определить равным ливню продолжительностью 1440 минут (24 часа) с повторяемостью в 1 год и в 10 лет. Далее рассмотрим, при какой площади ЗИ и площади непроницаемой поверхности возможно удерживать весь необходимый объем дождевой воды.

Дополнительно был рассчитан для Екатеринбурга максимальный суточный слой осадков для второго типа поверхностного стока⁶ по методологии расчета из СП 32.13330.2018 (табл. 9). Как видно из таблиц, рассчитанный слой осадков для продолжительности ливня в 24 часа (табл. 8)

4. Конечно, данный способ расчета озеленения территорий неточный, так как NDVI рассчитывается по данным спутника, а результат расчета отображается в виде сетки размером 30 x 30 м. Однако более точная информация по местам размещения озеленения в Екатеринбурге отсутствует.

5. Не означает, что их нет в реальности, но для их выявления необходимы более точные данные.

6. Так как, согласно СП 32.13330.2018, расчеты для второго типа поверхностного стока основаны на определении 100% объема, в то время как для первого типа рассчитывается 70% объема поверхностного стока.

Таблица 8. Расчет интенсивности ливня (q, i), слоя осадков (h) во время события с повторяемостью Р и продолжительностью t ⁸ Источник: составлено автором.	Период однократного превышения Р (лет)	t (мин)						
		20 [Курганов, 1984]						
		10	30	60	120	360	1440	
		q (л/с на 1 га)						
	1	126,3	77,2	57,9	35,4	21,6	9,9	3,7
	10	292,8	179,0	134,2	82,1	50,2	23,0	8,6
	50	407,3	249,0	186,7	114,1	69,8	32,0	12,0
		h (мм)						
	1	7,6	9,3	10,4	12,7	15,6	21,4	32,0
	10	17,6	21,5	24,2	29,5	36,1	49,7	74,2
	50	24,4	29,9	33,6	41,1	50,2	69,1	103,3
		i (мм/ч)						
	1	45,5	27,8	20,8	12,7	7,8	3,6	1,3
	10	105,4	64,4	48,3	29,5	18,1	8,3	3,1
	50	146,6	89,6	67,2	41,1	25,1	11,5	4,3

Таблица 9. Значение максимального суточного слоя атмосферных осадков по методике расчета для второго типа поверхностного стока Источник: составлено автором.	Обеспеченность роб., %	Период однократного превышения Р, лет	Нормированное отклонение ординат от среднего значения Ф	Суточный слой жидких атмосферных осадков Нр, мм
	63	1	-0,46	25,9
	9,5	10	1,31	46,3

Таблица 10. Матрица объема дождевой воды, которую требуется удержать внутри пористого покрытия Источник: составлено автором.	t – продолжительность дождя (мин)	Винф. – объем воды, который будет инфильтрован во время дождя (м³)	Период однократного превышения Р, лет									
			Ad/Ab									
			Отношение площади непроницаемого покрытия к площади пористого покрытия									
			1	2	4	1	2	4	0	1	2	4
			–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
			V – объем дождевой воды, который должен быть удержан внутри пористого покрытия размером 1 на 1 м, расчет по формуле 2 (м³)									
	10	0,0004	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,08	0,02	0,05	0,07	0,11
	20	0,0008	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,10	0,03	0,06	0,08	0,14
	30	0,0012	0,02	0,03	0,05	0,04	0,07	0,11	0,03	0,06	0,09	0,15
	60	0,0024	0,02	0,03	0,06	0,05	0,08	0,19	0,08	0,08	0,11	0,19
	120	0,0048	0,02	0,04	0,07	0,06	0,10	0,16	0,05	0,09	0,14	0,23
	360	0,0144	0,03	0,05	0,08	0,08	0,12	0,21	0,05	0,12	0,18	0,30
	1440	0,0576	0,00	0,03	0,09	0,08	0,15	0,28	0,05	0,14	0,23	0,42

8. Для наглядности в таблицу были включены значения при Р = 50 лет.

Рис. 4. Процент необходимой площади дождевых садов для сбора 100% поверхностного стока от доступной площади для их размещения в сценариях 2 и 3, с P = 1 год и P = 10 лет*

Источник: составлено автором, данные автора.

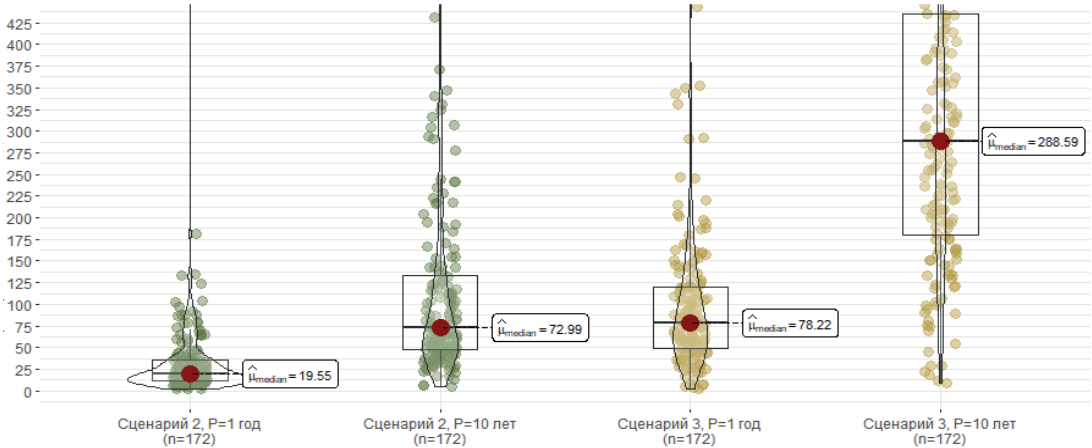


Таблица 11. Матрица объема дождевой воды, которую требуется удержать внутри дождевого сада

Источник: составлено автором.

t – продолжительность дождя (мин)	Винф. – объем воды, который будет инфильтрирован во время дождя (м³)	Период однократного превышения P, лет											
		1			10			50					
		Отношение площади непроницаемого покрытия к площади дождевого сада Ad/Ab											
		5	10	16	3	5	10	16	3	5	10	16	
$\bar{V}$ – объем дождевой воды, который должен быть удержан внутри дождевого сада размером 1 x 1 м, расчет по формуле 2 (м³)													
10	0,0004	0,04	0,08	0,12	0,06	0,10	0,18	0,27	0,09	0,13	0,24	0,38	
20	0,0008	0,05	0,09	0,14	0,08	0,12	0,21	0,33	0,11	0,16	0,30	0,46	
30	0,0012	0,06	0,10	0,16	0,09	0,13	0,24	0,37	0,12	0,18	0,33	0,52	
60	0,0024	0,07	0,07	0,07	0,11	0,16	0,29	0,45	0,04	0,22	0,41	0,63	
120	0,0048	0,08	0,15	0,24	0,13	0,19	0,36	0,55	0,18	0,27	0,50	0,77	
360	0,0144	0,10	0,20	0,32	0,17	0,26	0,48	0,75	0,24	0,37	0,68	1,05	
1440	0,0576	0,12	0,26	0,44	0,22	0,35	0,68	1,09	0,32	0,51	0,98	1,53	

получился выше значения максимального суточного слоя (табл. 9). То есть расчетные значения интенсивности ливня, которые будут использоваться в дальнейших вычислениях, не ниже, а, наоборот, выше значений, получаемых по расчетам из СП 32.13330.2018.

Согласно источнику, на территории Свердловской области преобладают глинистые и суглинистые грунты [Почвенная карта России, n.d.]. Предлагаем считать, что на рассматриваемой территории скорость фильтрации грунта будет равна минимально допустимой, то есть 0,0036 м/ч. Тогда, учитывая коэффициент безопасности 1,5, расчетная скорость фильтрации будет равна 0,0024 м/ч.

Используя формулу 2, рассчитаем матрицу объема дождевой воды, которую требуется удержать в пористом покрытии (табл. 10) и в дождевых садах (табл. 11)

во время событий с повторяемостью в 1 год и в 10 лет и продолжительностью от 20 минут до 24 часов. В расчетах для таблиц 10 и 11 использовался коэффициент стока с непроницаемого покрытия $\Psi_i = 0,9$; площадь дождевого сада и пористого покрытия бралась равной 1 м² (Ab). Помимо этого, были произведены расчеты для разной площади непроницаемого покрытия Ad/Ab с целью определить, с какой максимально возможной площади непроницаемого покрытия можно удержать весь поверхностный сток в пористом покрытии и в дождевом саду. Для наглядности также были произведены расчеты для P = 50 лет.

Фиолетовым отмечены значения объема дождевой воды, превышающие максимально возможную вместимость 1 м² пористого покрытия, – 0,1 м³ (табл. 10 и 7) и 1 м² дождевого сада – 0,27 м³ (табл. 11 и 7). То есть 1 м² пористого покрытия сможет

9. Продолжительность ливня 24 часа.

Таблица 12.

Матрица объема
дождевой воды,
которую требуется
удержать внутри
дождевого сада

Источник: состав-
лено автором.

t – продол-
жительность
дождя (мин)

Винф. –
объем воды,
который будет
инфильтриро-
ван во время
дождя (м³)

Период однократного превышения P, лет

1
—

10
—

50
—

Отношение площади газона к площади дождевого сада Ad/Ab

20
—

30
—

80
—

20
—

30
—

80
—

20
—

30
—

80
—

V – объем дождевой воды, который должен быть удержан внутри дождевого сада
размером 1 x 1 м, расчет по формуле 2 (м³)

10
20
30
60
120
360
1440

0,0004
0,0008
0,0012
0,0024
0,0048
0,0144
0,0576

0,02
0,03
0,03
0,04
0,04
0,05
0,04

0,03
0,04
0,04
0,04
0,06
0,07
0,07

0,07
0,08
0,09
0,04
0,14
0,18
0,23

0,05
0,06
0,07
0,09
0,10
0,13
0,17

0,07
0,09
0,10
0,12
0,14
0,18
0,24

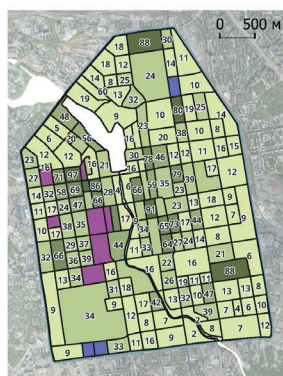
0,16
0,19
0,22
0,26
0,32
0,43
0,61

0,07
0,09
0,10
0,12
0,15
0,19
0,25

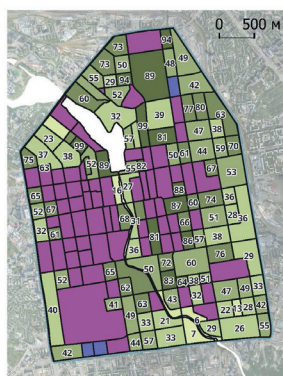
0,10
0,12
0,13
0,16
0,20
0,26
0,36

0,22
0,27
0,30
0,37
0,45
0,61
0,87

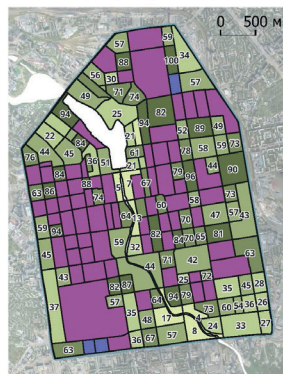
Сценарий 2, P = 1 год



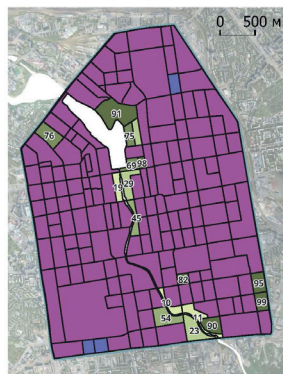
Сценарий 2, P = 10 лет



Сценарий 3, P = 1 год



Сценарий 3, P = 10 лет



Процент необходимого
количества дождевых
садов от возможного
места для их
размещения в
сценариях 2 и 3 с
P=1 год и P=10 лет

0 - 20
20 - 40
40 - 60
60 - 80
80 - 100

недостаточно
места для
размещения
необходимой
площади дождевых
садов с целью
удержания
100% осадков

наличие
технических
ограничений

Рис. 5. Процент
необходимой пло-
щади дождевых
садов для сбора
100 % поверхнос-
ного стока от до-
ступной площади
для их размещения
в сценариях 2 и 3
(рис. 3), с P = 1 год
и P = 10 лет

Источник: состав-
лено автором,
данные автора.

удержать объем дождевой воды, не только попадающей на его поверхность, поверх-
ностный сток с прилегающей территории,
которая в четыре раза больше площади
пористого покрытия во время ливня P=1
год и продолжительностью в 24 часа. При
этом во время события P = 10 лет, продол-
жительностью 24 часа, 1 м² пористого по-
крытия сможет полностью удержать по-
верхностный сток с непроницаемого
покрытия площадью 1 м². А при P = 50 лет
пористое покрытие сможет только удер-
жать объем осадков, образуемый на его

поверхности во время ливня продолжи-
тельностью в 24 часа (табл. 10).

Также 1 м² дождевого сада сможет удер-
жать поверхностный сток с непроницаемо-
го покрытия в 10 м² при событии P = 1 год,
t = 24 часа. Однако при событии P = 10 лет,
t = 24 часа поверхностный сток сможет
быть удержан только с площади непрони-
цаемого покрытия, равной 3 м² (табл. 11).

Также для сбора поверхностного стока
с озелененных территорий была рассчита-
на матрица объема дождевой воды, тре-
буемой для удержания в дождевом саду
(табл. 12). В расчетах для таблицы 12 ис-
пользовался коэффициент стока с газона
 $\Psi_1 = 0,1$.

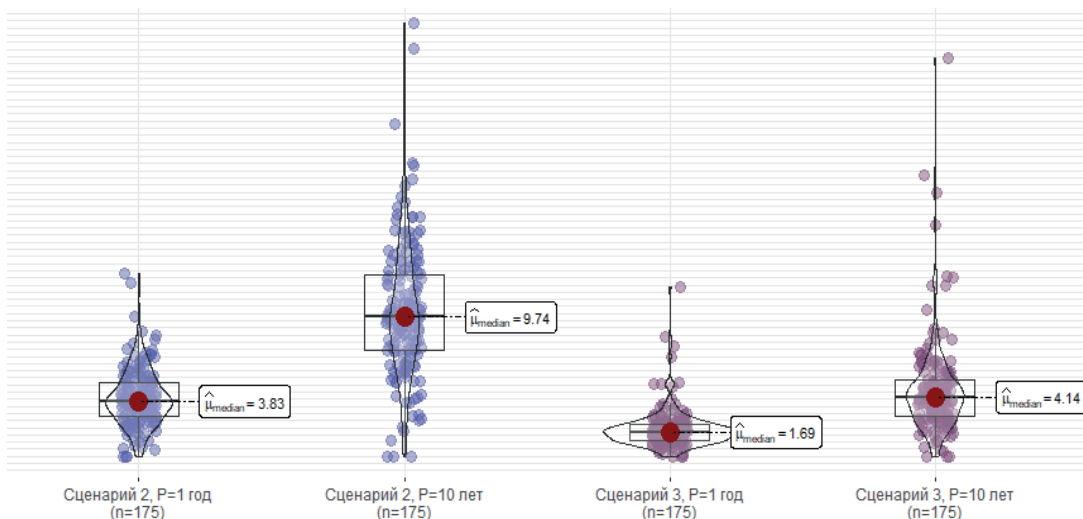
В целом расчеты показывают, что для
события P = 1 год, t = 24 часа 1 м² пористо-
го покрытия сможет удержать поверхнос-
тный сток с примыкающей территории не-
проницаемого покрытия площадью 4 м²;
1 м² дождевого сада сможет удержать по-
верхностный сток без образования пере-
лива с площади непроницаемого покрытия
10 м² и с площади озелененных террито-
рий 80 м². Также для события P = 10 лет, t =
24 часа 1 м² пористого покрытия удержит
поверхностный сток с площади непрони-
цаемого покрытия 1 м²; 1 м² дождевого сада
удержит поверхностный сток с площади
3 м² непроницаемого покрытия и с площа-
ди озелененных территорий 30 м².

Следующим шагом необходимо рассчи-
тать количество необходимых проникае-
мых покрытий и дождевых садов на рас-
считываемой территории для удержания
поверхностного стока событий P = 1 год
и P = 10 лет, t = 24 часа.

Для проведения расчетов необходимо
количества ЗИ рассматриваемая терри-

Рис. 6. Возможное снижение высоты поверхностного стока (мм) на 1 м² каждого кластера при реализации сценариев 2 и 3 с P = 1 год и P = 10 лет

Источник: составлено автором, данные автора.



тория была разделена по осям УДС на кластеры. Предлагается считать, что образуемый поверхностный сток будет удерживаться за счет пористых покрытий и дождевых садов внутри каждого кластера. Использовался одинаковый алгоритм расчета необходимого количества ЗИ для сценария 2 (рис. 3.2) и для сценария 3 (рис. 3.3), расчеты производились в границах каждого кластера.

В результате всех вычислений была найдена общая площадь дождевых садов, необходимых для сбора 100% поверхностного стока со всех покрытий, а также площадь пористых покрытий. А затем рассчитан процент дождевых садов от общей площади, подходящей под их размещение (рис. 4 и 5).

Как видно из рис. 4, сценарий 2, 50% кластеров смогут полностью удержать поверхностный сток, образуемый внутри их границ, при P = 1 год, если на 20% подходящей территории под дождевые сады разместить их внутри каждого кластера, при P = 10 лет нужно 73% территории преобразовать в дождевые сады от имеющейся возможности (рис. 4 и 3.2). 50% кластеров удержат полный объем поверхностного стока при P = 1 год, если 78% территории, определенно подходящей под дождевые сады в сценарии 3, будет в них преобразована. При P = 10 лет в сценарии 3 для большей части кластеров не хватает доступного места для размещения необходимой площади дождевых садов (рис. 4 и 3.3).

В целом на рис. 5 видно, что три территории имеют технические ограничения

для размещения ЗИ. Также при P = 1 год 165 кластеров из 175 имеют возможности для размещения дождевых садов в сценарии 2 (рис. 3.2) с целью сбора 100% поверхностного стока внутри их границ, в сценарии 3 (рис. 3.3) – 107 кластеров. При P = 10 лет в сценарии 2 – 107 кластеров смогут удержать 100% поверхностного стока, в сценарии 3 – только 17 из 175.

Также, если внутри кластеров будет реализовано пористое покрытие площадью, рассчитанной для сценариев 2 и 3, а также максимальное количество дождевых садов, которое необходимо и для которых имеется возможное место для размещения¹⁰, то при P = 1 год в сценарии 2 удастся снизить высоту поверхностного стока на 1 м² для 50% кластеров на 3,8 мм, в сценарии 3 – на 1,7 мм (рис. 6). При P = 10 лет в сценарии 2 высота поверхностного стока внутри 50% кластеров будет снижена на 9,7 мм, а в сценарии 3 – на 4,1 мм (рис. 6).

Таким образом, используя разработанную методологию, возможно определить места, подходящие под размещение ЗИ, а также провести расчеты необходимого количества ЗИ для удержания дождевой воды. Точность результатов напрямую зависит от качества исходных данных. Во время проведения апробации не учитывалось точное размещение ЗИ, что может быть ограничением при проведении расчетов в масштабе города; также в расчетах использовались одинаковые конструктивные параметры для дождевых садов и пористых покрытий. Однако при работе в масштабе, например, земельного

10. Для части кластеров, которые имеют место для размещения нужного количества дождевых садов, в качестве площади дождевых садов бралась необходимая площадь; для части кластеров, которые не имеют места для размещения дождевых садов, бралась та площадь, которая имеется для их размещения (рис. 3).

участка, квартала будет значительно проще определить точное место размещения ЗИ, а также территорию, с которой необходимо будет собрать поверхностный сток, поэтому и расчеты будут точнее. Также возможно проводить расчеты для разных типов ЗИ с различными конструктивными параметрами.

3.2. Рекомендации по формированию нормативной базы

Политика управления дождевой водой в России базируется на использовании сетевой инфраструктуры. На текущий момент только 3 типа ЗИ зафиксировано в строительных правилах, при этом политика управления дождевой водой при помощи ЗИ не сформирована. Лишь в нескольких муниципальных образованиях выпускаются методические рекомендации по реализации ЗИ. Однако по большей части они посвящены описанию дождевых садов и не несут правовой силы. Правила благоустройства, так же как и другие нормативы проектирования, в вопросе управления дождевой водой вовне зданий ссылаются на СП 32.13330, в котором не содержится упоминаний о ЗИ. Несмотря на то что вопрос управления дождевой водой находится в ведении муниципального уровня, зарубежный опыт показывает необходимость выстраивания иерархии полномочий и документов, начиная с федерального уровня. Далее будут представлены рекомендации для федерального и муниципального уровней. Уровень региональной власти пропущен, так как ее функция, как нам представляется, заключается в осуществлении связи нормативно-правовой базы, разработанной на федеральном уровне, с реализацией на местном уровне.

Рекомендации для федерального уровня:

1. Необходимо сформулировать цели и задачи управления дождевой водой при помощи ЗИ. Ввести требование сбора поверхностного стока при помощи ЗИ. Признать, что позиционирование применения ЗИ только в муниципальных образованиях без централизованной ливневой канализации ошибочно¹¹. На примере апробации было пока-

зано, что при помощи строительства ЗИ возможно снизить объем образуемого поверхностного стока. А значит, при помощи ЗИ возможно снизить нагрузку на ливневую канализацию, что особенно важно во время первых минут ливня, когда интенсивность выпадения осадков высокая.

2. Следует расширить типологию ЗИ, сформировать терминологический словарь. Необходимо помнить, что ЗИ в первую очередь представляет систему связанных элементов, где одни типы могут отвечать за транспортировку осадков, другие — за удержание дождевой воды, а третьи — за очистку разных типов поверхностных стоков. Только используя сочетание разных типов ЗИ, возможно достичь эффективного управления дождевой водой.
3. Провести исследование на предмет определения критериев для составления рейтинга приоритетности реализации ЗИ на муниципальном уровне. Пример рейтинга был представлен в таблице 5, а критерии — в таблице 6. В результате введения рейтинга удастся расставить приоритеты реализации разных типов ЗИ и получить больше преимуществ при меньших издержках.
4. Важно разработать методологию проектирования ЗИ для событий разной повторяемости: 1, 10, 30, 100 лет. В разработанной методологии был предложен возможный алгоритм расчета объема дождевой воды, которую может удержать ЗИ для событий в 1 год и в 10 лет. Однако способ расчета данных интенсивностей ливней требует актуализации и уточнения. При проектировании ЗИ важно учитывать наличие процесса инфильтрации, поэтому данных высоты слоя осадков, содержащихся в СП 32.13330, недостаточно. Правильнее применять в расчетах интенсивность выпадения осадков и их продолжительность, а также строить матрицу объема дождевой воды внутри каждого типа ЗИ для определения стандарта обслуживания ЗИ и случаев, при которых может возникнуть перелив, что и было предложено в методологии. Для расчета событий 30 и 100 лет алгоритм расчета, представленный в методологии, не подойдет, так как для расчетов событий 30

11. Речь идет о методических рекомендациях, разработанных на уровне Минстроя, — Методические рекомендации по организации водоотвода на улично-дорожной сети городов, не имеющих подземной (трубопроводной) ливневой канализации.

и 100 лет следует учитывать наличие системы перелива, маршрут и скорости перемещения осадков, медленный выпуск воды из систем долгосрочного хранения и их расположение.

5. Следует определить значение поправочных коэффициентов на изменение климата для разных муниципальных образований, так как управление дождевой водой должно осуществляться на перспективу, с учетом качественных прогнозов.
6. Закрепить рекомендуемые значения коэффициентов безопасности фильтрации грунтов, ввести коэффициент на развитие городской среды, связанный с увеличением непроницаемых покрытий в результате будущего развития территорий.
7. Для упрощения расчетов возможно разработать типологические таблицы для разных типов ЗИ либо программное обеспечение с целью упрощения процесса проектирования и расчета объема дождевой воды.
8. Следует провести ряд исследований на способность разных типов ЗИ очищать разные типы поверхностного стока. Определить, какие типы ЗИ и с каким устройством основания следует применять для очистки стока от разных веществ.
9. Провести анализ применяемых нормативов для проектирования на предмет наличия ограничений по организации ЗИ.
10. Определить программы финансирования; например, развитие ЗИ может быть включено одновременно в реализацию нескольких национальных проектов: «Безопасные и качественные дороги», «Жилье и городская среда», «Образование», «Экология».
11. Также следует сформировать общую базу реализованных проектов ЗИ в стране с целью проведения исследований для улучшения процесса проектирования, а также для поиска примеров успешно работающих проектов ЗИ и их имплементации на территориях со схожими условиями.

Рекомендации для муниципального уровня:

1. Разработать долгосрочный план реализации ЗИ, для этого нужно провести аналитическую работу, связанную

с определением подходящих мест для реализации разных типов ЗИ. Также необходимо осуществлять фиксацию мест подтоплений.

2. Ввести реестр реализации ЗИ для контроля обслуживания и эффективности работы ЗИ.
3. Включить в правила благоустройства расчетные значения, которые следует применять при проведении гидравлического расчета для управления дождевой водой.
4. Разработать рейтинг приоритетности реализации ЗИ на основе критериев, сформированных на федеральном уровне.
5. Проводить политику информирования заинтересованных сторон, создавать стимулы для собственников земельных участков строить ЗИ, реализовывать демонстрационные площадки, проводить обучающие семинары.
6. Сформировать источники финансирования для управления дождевой водой.
7. Разработать правила организации обслуживания и эксплуатации ЗИ.

В целом для реализации политики управления дождевой водой следует в первую очередь сформировать нормативно-правовую базу на федеральном уровне, а затем проработать политику реализации ЗИ на местном уровне.

В результате развития ЗИ возможно получить прямые и косвенные эффекты.

I. Прямые эффекты:

1. Снижение риска возникновения подтоплений. При помощи ЗИ возможно замедлить скорость потока и снизить объем образуемого поверхностного стока, так как реализация ЗИ направлена на перехват осадков в месте их выпадения. В результате снижается вероятность возникновения перегрузки традиционной ливневой канализации, а следовательно, и риски возникновения подтопления.
2. Значительное сокращение расходов на модернизацию серой инфраструктуры с целью повышения ее пропускной способности для отвода пиковых ливневых нагрузок. Поскольку пиковые нагрузки будет принимать на себя зеленая инфраструктура, следовательно, исчезнет необходимость в проведении работ по увеличению пропускной способности серой инфраструктуры.

3. Улучшение качества воды. Во-первых, при помощи фильтрующего и дренажного слоя ЗИ возможно очистить поверхностный сток от осадка и разных видов загрязняющих веществ. Во-вторых, объем поверхностного стока, который пройдет очистку, будет выше, чем при устройстве водоотведения при помощи серой инфраструктуры.
4. Повышение биоразнообразия. Водно-болотные угодья, пруды, свалы, дождевые сады, резервуары накопления осадков с озелененным покрытием, конструкции для деревьев – места обитания растений и животных, а значит, их реализация будет способствовать увеличению биоразнообразия.
5. Улучшение качества городской среды. Во-первых, при помощи строительства ЗИ возможно улучшить визуальное восприятие территорий. Во-вторых, создать пространства для отдыха горожан, что также повлияет и на улучшение качества их жизни.

Косвенные эффекты:

1. Улучшение здоровья и самочувствия горожан. В результате реализации ЗИ возможно повысить доступность природных территорий, повысить визуальную привлекательность, улучшить качество воздуха, что может положительно повлиять на физическое и психологическое здоровье горожан.
2. Экономические выгоды. Во-первых, могут быть сэкономлены средства на проведение восстановительных работ по ликвидации последствий подтоплений. Во-вторых, улучшение качества городской среды, вследствие реализации ЗИ, может привести к повышению цен на недвижимость и привлечь инвестиции. В-третьих, могут быть созданы рабочие места для проектирования, обслуживания и строительства ЗИ.
3. Уменьшение масштабов ремонтных работ на территории города. Создание зеленой инфраструктуры снимет пиковые нагрузки по отводу поверхностного стока с серой инфраструктуры. Как следствие, сократится необходимость проводить строительные работы по увеличению пропускной способности серой ливневой канализации, связанные с перекапыванием значительных городских территорий, активным

вмешательством в городское благоустройство и созданием неудобств для горожан.

4. Образование и формирование сообществ. Реализация ЗИ может сопровождаться обучением городских сообществ, что положительно повлияет на формирование экологического сознания горожан, а также на организацию сотрудничества между местными органами власти, застройщиками и горожанами.
5. Адаптация к изменению климата. Помимо снижения риска подтоплений, ЗИ может способствовать снижению эффекта теплового острова, что, в свою очередь, также положительно повлияет на здоровье горожан – снизятся случаи возникновения теплового удара.

Заключение

В результате проведенного исследования была разработана методология определения подходящих мест размещения ЗИ в городах России. Также разработан алгоритм расчета количества дождевой воды, который должен быть удержан при помощи ЗИ. Методология охватывает 8 типов ЗИ: инфильтрационные траншеи, сухие свалы, дождевые сады, пористое мощение, водно-болотные угодья, резервуары накопления, конструкции для деревьев, полосы фильтров, совмещенные с дренажными фильтрами. Алгоритм выполнения включает 5 этапов: 1) определение возможности для размещения ЗИ; 2) проведение детального анализа для размещения подходящих типов ЗИ; 3) расчет матрицы объема дождевой воды, которую необходимо удержать в ЗИ во время событий с повторяемостью в 1 год и в 10 лет и продолжительностью от 20 минут до 24 часов; 4) расчет вместимости ЗИ; 5) сравнение полученных расчетов.

Разработанная методология была апробирована на центральной части города Екатеринбурга. Также сформулированы рекомендации для федерального и муниципального уровней по формированию нормативной базы для развития ЗИ. Основная часть рекомендаций затрагивает создание политики управления дождевой водой при помощи ЗИ на федеральном уровне. Кроме того, были описаны прямые и косвенные эффекты, которые возможно получить в результате реализации ЗИ.

Разработанная методология позволяет определить потенциальные места для раз-

мещения ЗИ и провести рамочные расчеты в разных масштабах – от города до земельного участка во время наиболее частых ливней. Однако точность результатов напрямую зависит от качества исходных данных. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение расчетных коэффициентов: на изменение климата, развитие городской среды, безопасность фильтрации, коэффициентов стока. Необходимо также вести работу над разработкой методологии проектирования ЗИ для режима экстремальных ливней.

Источники

- Агентства, Е.М., & др. (2022). *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации* (А.А. Киселев, Е.Л. Махоткина, Т.В. Павлова, ред.). Санкт-Петербург: Научно-емкие технологии.
- Александровская, К.А., & др. (2021). *Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Зеленая инфраструктура и экосистемные услуги крупнейших городов России* (О.А. Климанов, ред.). Москва: Издательство Центра охраны дикой природы.
- Государственная Дума Российской Федерации. (2001). *Земельный кодекс Российской Федерации* (ЗК РФ) от 25.10.2001 № 136-ФЗ (в ред. от 03.04.2023). Официальный сайт Президента России. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/17478>.
- Кашицина, А.С. (2021). *Роль зеленой инфраструктуры в управлении ливневыми стоками* [Выпускная квалификационная работа]. НИУ ВШЭ.
- Курганов, А.М. (1984). *Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения*. Москва: Стройиздат.
- Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. (2019). *Методические рекомендации «по организации водоотвода на улично-дорожной сети городов, не имеющих подземной (трубопроводной) ливневой канализации»*.
- Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. (2021). *Приказ № 1042/пр «Об утверждении методических рекомендаций по разработке норм и правил по благоустройству территорий муниципальных образований»* от 29.12.2021. Официальный сайт Минстроя России. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/138187/>.
- Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. (2016a). *СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83 Основания зданий и сооружений»* от 16.12.2016 (с изм. и допол. в ред. от 27.12.2021). Официальный сайт Минстроя России. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>.
- Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. (2016b). *СП 42.13330.2016 «СНиП 2.07.01-89 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений»*. от 30.12.2016 (с изм. и допол. в ред. от 9.06.2022). Официальный сайт Минстроя России. Режим доступа: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/14465/>.
- Мирные Жители (n.d.). *Обсуждение нового стандарта благоустройства улиц*. Режим доступа: <https://peacefulpeople.ru/uds>.
- Почвенная карта России. (n.d.). *Почвенная карта России*. Режим доступа: <https://soil-db.ru/map?lat=56.8279&lng=62.0013&feature=25358&zoom=9>.
- Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. (2022). *СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов* (с изм. и допол. в ред. от 28.02.2022). Режим доступа: <http://26.rosпотребнадзор.ru/ond/sn/1847/>.
- Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. (2022). *ГОСТ 17.4.3.06-2020 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к классификации почв по влиянию на них химических загрязняющих веществ. Технический стандарт»*. Режим доступа: https://www.gost.ru/portal/gost/home/standarts/cataloginter?portal:componentId=26cba537-adcd-44e-d-9a44-72c63a7c7bc2&portal:isSecure=false&portal:portletMode=view&navigationalState=JBPNS_r00ABXdPAAP1bnRpdH10YW11AAAAAQAALRE9DVU1FT1RfMzUABmFjdGlvbGAAAEABnN1YXJjaAAIZW50aXR5S WQAAAAABAU0MjQwNQANX19FT0ZfXw**.
- Федеральный закон Российской Федерации. (2002). *Федеральный закон «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации»* от 25.06.2002 № 73-ФЗ (с изм. и допол. в ред. от 14.04.2023). Официальный сайт Администрации Президента. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/18230>.
- Abera, L.E., Surbeck, C.Q., & Alexander, K. (2021). Evaluating the effect of city ordinances on the implementation and performance of green stormwater infrastructure (GSI). *Environmental Challenges*, 4, 100183. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100183>.
- CIRIA. (2015). *The SuDS Manual (C753F)*. Daywater. (n.d.). *ADSS: Adaptive Decision Support System*. Retrieved from <http://daywater.in2p3.fr/EN/>
- European Commission. (2013). *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Green Infrastructure (GI) – enhancing Europe's natural capital*. An official website of the

- European Union. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0249>.
- Fletcher, T.D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261-279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>.
- Frontiera, P., Kauhanen, P., & Kunze, M. (2014). *GreenPlanIT LID Site Suitability Tool* (p. 36).
- Hallegatte, S., & Corfee-Morlot, J. (2011). Understanding climate change impacts, vulnerability and adaptation at city scale: An introduction. *Climatic Change*, 104(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9981-8>.
- Jiménez Ariza, S.L., Martínez, J.A., Muñoz, A.F., Quijano, J.P., Rodríguez, J.P., Camacho, L.A., & Díaz-Granados, M. (2019). A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability*, 11(8), 2312. <https://doi.org/10.3390/su11082312>.
- Kuller, M., Bach, P.M., Roberts, S., Browne, D., & Deletic, A. (2019). A planning-support tool for spatial suitability assessment of green urban stormwater infrastructure. *Science of The Total Environment*, 686, 856-868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.051>.
- NDVI – teoriia i praktika. (n.d.). GIS LAB. Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.
- Roberts, S., Browne, D., & Lloyd, S. (2017). *Priority Stormwater Projects for a Water Sensitive Darebin* [Unpublished manuscript].
- Schreider, S.Y., Smith, D.I., & Jakeman, A.J. (2000). Climate change impacts on urban flooding. *Climatic Change*, 47, 91-115.
- The Philadelphia Water Department (PWD). (n.d.). *Chapter 3 – Site design and stormwater management integration. 3.2 Stormwater management design*. Retrieved from <https://staging.pwdplanreview.org/manual/chapter-3/3.2-stormwater-management-design-strategies>.
- Thévenot, D.R. (Ed.). (2008). *Daywater: An Adaptive Decision Support System for Urban Stormwater Management*. London: IWA Publishing.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2008). *Action Strategy: "Managing Wet Weather with Green Infrastructure"*. Retrieved from https://stormwaterpa.org/assets/media/benefits/gi_action_strategy.pdf.
- Uribe-Aguado, J., Jiménez-Ariza, S.L., Torres, M.N., Bernal, N.A., Giraldo-González, M.M., & Rodríguez, J.P. (2022). A SUDS Planning Decision Support Tool to Maximize Ecosystem Services. *Sustainability*, 14(8), 4560. <https://doi.org/10.3390/su14084560>.
- Yao, Y. (2022). Optimizing the layout of coupled grey-green stormwater infrastructure with multi-objective oriented decision making. *Journal of Cleaner Production*, 367, Article 133061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133061>.
- ## A METHODOLOGY FOR IMPLEMENTING ELEMENTS OF GREEN INFRASTRUCTURE ELEMENTS INTO URBAN PLANNING SOLUTIONS FOR STORMWATER MANAGEMENT
- Ekaterina S. Andreeva, lecturer, Vysokovsky Graduate School of Urbanism, Faculty of Urban and Regional Development, HSE University, Moscow, Russian Federation.
E-mail: esandreevoy@gmail.com
- Climate change and increasing urbanization pose new challenges to sustainable urban development. The competitiveness of cities depends on how urban policies respond to climate change challenges. Intense rainfall can flood streets and houses, especially in cities with outdated stormwater drainage systems and low permeable surfaces. In response to the challenges associated with climate change, including increased precipitation,, international practice has developed a strategy of stormwater management based on the imitation of natural hydrological processes, through the construction of green infrastructure (GI). In Russia, stormwater management predominantly relies on gray infrastructure, but initiatives to implement GI are also emerging. While several types of GI have been incorporated into construction regulations, standards for their design calculations have not yet been developed. This study proposes a methodology for identifying potential locations for GI and an algorithm for calculating the volumes of stormwater it can manage. The methodology is based on research into GI policy development and design guidelines used in cities such as Philadelphia and London. It enables an assessment of GI's capacity to intercept stormwater during frequent rainstorms with recurrence intervals of 1 and 10 years, lasting 24 hours. The methodology was tested in the central part of Yekaterinburg, Russia. Recommendations were developed for federal and municipal authorities to create a regulatory framework for GI development. Direct and indirect benefits of GI implementation were also identified.
- Keywords:** green infrastructure; gray infrastructure; surface runoff; climate change; stormwater management; stormwater drainage
- Citation:** Andreeva, E.S. (2025) A methodology for implementing elements of green infrastructure

elements into urban planning solutions for stormwater management. *Urban Studies and Practices*, vol. 10, no 2, pp. 109–133. <https://doi.org/10.17323/usp1022025109-133>.

References

Abera, L.E., Surbeck, C.Q., & Alexander, K. (2021). Evaluating the effect of city ordinances on the implementation and performance of green stormwater infrastructure (GSI). *Environmental Challenges*, 4, 100183. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100183>.

Akenteva, E.M., et al. (2022). *Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniakh klimata i ikh posledstviakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation] (A.A. Kiselev, E.L. Makhotkina, T.V. Pavlova, Eds.). Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii. (in Russian)

Aleksandriiskaia, K.A., et al. (2021). *Ekosistemnye uslugi Rossii: prototip natsional'nogo doklada. Zelenaya infrastruktura i ekosistemnye uslugi krupneishikh gorodov Rossii* [Ecosystem Services of Russia: Prototype National Report. Green Infrastructure and Ecosystem Services of the Largest Cities in Russia] (O.A. Klimanov, Ed.). Moscow: Izdatel'stvo Tsentra okhrany dikoi prirody. (in Russian)

CIRIA. (2015). *The SuDS Manual* (C753F).

Daywater. (n.d.). ADSS: Adaptive Decision Support System. Retrieved from <http://daywater.in2p3.fr/EN/>.

European Commission. (2013). *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Green Infrastructure (GI) – enhancing Europe's natural capital*. An official website of the European Union. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0249>.

Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel'ei i blagopoluchiya cheloveka. (2022). *SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200-03. Sanitarno-zashchitnye zony i sanitarnaya klassifikatsiya predpriyatii, sooruzhenii i inykh ob'ektov* (s izm. i dopol. v red. ot 28.02.2022) [Sanitary-Epidemiological Norms 2.2.1/2.1.1.1200-03: Sanitary Protection Zones and Sanitary Classification of Enterprises,

Structures, and Other Facilities (as amended on 28.02.2022)]. Retrieved from <http://26.rospos-trebnadzor.ru/ond/sn/1847/> (in Russian)

Federal'noe agentstvo po tekhnicheskoy regulirovaniyu i metrologii. (2022). *GOST 17.4.3.06-2020 "Okhrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k klassifikatsii pochvy po vliyaniyu na nikh khimicheskikh zagryaznyayushchikh veshchestv. Tekhnicheskii standart"* [GOST 17.4.3.06-2020 «Environmental Protection. Soil. General Requirements for Soil Classification According to the Impact of Chemical Pollutants. Technical Standard»]. Retrieved from https://www.gost.ru/portal/gost/home/standarts/catalog-inter?portal:componentId=26c-ba537-adcd-44ed-9a44-72c63a7c7bc2&-portal:isSecure=false&portal:portletMode=view&navigationState=JB-PNS_00ABXdPAAplbnRpdHl0YW-11AAAAAALRE9DVU1FTlRfMzUABMFj-dGlvbgAAAAEABnNlYXJjaAAIZW50aXR-5SWQAAAAABAAUOMjQWNAHX19FTOZfXw** (in Russian)

Federal'nyi zakon Rossiiskoi Federatsii. (2002). *Federal'nyi zakon «Ob ob'ektakh kul'turnogo naslediya (pamyatnikakh istorii i kul'tury) narodov Rossiiskoi Federatsii» ot 25.06.2002 № 73-FZ* (s izm. i dopol. v red. ot 14.04.2023) [Federal Law of the Russian Federation «On Cultural Heritage Sites (Historical and Cultural Monuments) of the Peoples of the Russian Federation» of 25.06.2002 No. 73-FZ (as amended on 14.04.2023)]. Otsial'nyi sait Administratsii Prezidenta [Official Website of the Presidential Administration]. Retrieved from <http://www.kremlin.ru/acts/bank/18230> (in Russian)

Fletcher, T.D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>

Frontiera, P., Kauhanen, P., & Kunze, M. (2014). GreenPlanIT LID Site Suitability Tool (p. 36). Gosudarstvennaia Duma Rossiiskoi Federatsii; Sovet Federatsii Rossiiskoi Federatsii. (2001). *Zemel'nyi kodeks Rossiiskoi Federatsii* (ZK RF) ot 25.10.2001 № 136-FZ (v red. ot 03.04.2023) [Land Code of the Russian Federation (LC RF) of 25.10.2001 No. 136-FZ (as amended on

03.04.2023)]. Otsial'nyi sait Prezidenta Rossii [Official Website of the President of Russia]. Retrieved from <http://www.kremlin.ru/acts/bank/17478>.

Hallegatte, S., & Corfee-Morlot, J. (2011). Understanding climate change impacts, vulnerability and adaptation at city scale: An introduction. *Climatic Change*, 104(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9981-8>.

Jiménez Ariza, S.L., Martínez, J.A., Muñoz, A.F., Quijano, J.P., Rodríguez, J.P., Camacho, L.A., & Díaz-Granados, M. (2019). A multi-criteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability*, 11(8), 2312. <https://doi.org/10.3390/su11082312>.

Kashitsina, A.S. (2021). *Rol' zelenoi infrastruktury v upravlenii livnevymi stokami* [The Role of Green Infrastructure in Stormwater Management] [Graduate qualification work]. NIU VShE (National Research University Higher School of Economics). (in Russian)

Kuller, M., Bach, P.M., Roberts, S., Browne, D., & Deletic, A. (2019). A planning-support tool for spatial suitability assessment of green urban stormwater infrastructure. *Science of The Total Environment*, 686, 856–868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.051>.

Kurganov, A.M. (1984). *Tablitsy parametrov predel'noi intensivnosti dozhdia dlia opredeleniia raskhodov v sistemakh vodootvedeniia* [Tables of Maximum Rain Intensity Parameters for Determining Flows in Drainage Systems]. Moscow: Stroizdat. (in Russian)

Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii. (2019). *Metodicheskie rekomendatsii "Po organizatsii vodootvoda na ulichno-dorozhnoi seti gorodov, ne imeiushchikh podzemnoi (truboprovodnoi) livnevoy kanalizatsii"* [Methodological Recommendations on Stormwater Removal in Urban Street Networks without Underground (Pipeline) Storm Sewerage]. (in Russian)

Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii. (2021). *Prikaz № 1042/pr "Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendatsii po razrabotke norm i pravil po blagoustroistvu territorii munitsipal'nykh obrazovaniu ot*

- 29.12.2021 [Order No. 1042/pr "On Approval of Methodological Recommendations for the Development of Standards and Rules for the Improvement of Municipal Territories" of 29.12.2021]. Ofitsial'nyi sait Ministroia Rossii. Retrieved from <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/138187/> (in Russian)
- Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii. (2016a). SP 22.13330.2016 "SNiP 2.02.01-83 Osnovaniia zdaniy i sooruzhenii" ot 16.12.2016 (s izm. i dopol. v red. ot 27.12.2021) [SP 22.13330.2016 "SNiP 2.02.01-83 Foundations of Buildings and Structures" of 16.12.2016 (as amended on 27.12.2021)]. Ofitsial'nyi sait Ministroia Rossii. Retrieved from <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/> (in Russian)
- Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii. (2018). SP 396.1325800.2018 "Ulitsy i dorogi naselennykh punktov. Pravila gradostroitel'nogo proektirovaniia" ot 01.08.2018 (s izm. i dopol. v red. ot 27.12.2021) [SP 396.1325800.2018 "Streets and Roads of Settlements. Urban Planning Design Rules" of 01.08.2018 (as amended on 27.12.2021)]. Ofitsial'nyi sait Ministroia Rossii. Retrieved from <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/17951/> (in Russian)
- Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii. (2016b). SP 42.13330.2016 "SNiP 2.07.01-89 Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i sel'skikh poselenii" ot 30.12.2016 (s izm. i dopol. v red. ot 9.06.2022) [SP 42.13330.2016 "SNiP 2.07.01-89 Urban Planning. Design and Development of Urban and Rural Settlements" of 30.12.2016 (as amended on 9.06.2022)]. Ofitsial'nyi sait Ministroia Rossii. Retrieved from <https://minstroyrf.gov.ru/docs/14465/> (in Russian)
- Mirnye Zhiteli. (n.d.). *Obsuzhdenie novogo standarta blagoustroystva ulits [Discussion of the New Street Improvement Standard]*. Retrieved from <https://peacefulpeople.ru/uds/> (in Russian)
- NDVI – teoriia i praktika. (n.d.). GIS LAB. Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.
- Roberts, S., Browne, D., & Lloyd, S. (2017). *Priority Stormwater Projects for a Water Sensitive Darebin* [Unpublished manuscript].
- Schreider, S.Y., Smith, D.I., & Jakeman, A.J. (2000). Climate change impacts on urban flooding. *Climatic Change*, 47, 91–115.
- soil-db.ru. (n.d.). *Pochvennaya karta Rossii [Soil Map of Russia]*. Retrieved from <https://soil-db.ru/map?lat=56.8279&lng=62.0013&feature=25358&zoom=9> (in Russian)
- The Philadelphia Water Department (PWD). (n.d.). *Chapter 3 – Site design and stormwater management integration. 3.2 Stormwater management design*. Retrieved from <https://staging.pwdplanreview.org/manual/chapter-3/3.2-stormwater-management-design-strategies>.
- Thévenot, D.R. (Ed.). (2008). *Daywater: An Adaptive Decision Support System for Urban Stormwater Management*. London: IWA Publishing.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2008). *Action Strategy: "Managing Wet Weather with Green Infrastructure"*. Retrieved from https://stormwaterpa.org/assets/media/benefits/gi_action_strategy.pdf.
- Uribe-Aguado, J., Jiménez-Ariza, S.L., Torres, M.N., Bernal, N.A., Giraldo-González, M.M., & Rodríguez, J.P. (2022). A SUDS Planning Decision Support Tool to Maximize Ecosystem Services. *Sustainability*, 14(8), 4560. <https://doi.org/10.3390/su14084560>.
- Yao, Y. (2022). Optimizing the layout of coupled grey-green stormwater infrastructure with multi-objective oriented decision making. *Journal of Cleaner Production*, 367, Article 133061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133061>.