

УДК 631.422+628.8

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-5

ТЕХНОЛОГИИ ЗЕЛЕННЫХ КРЫШ В СОВРЕМЕННОЙ ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ (ОБЗОР)

Губаева И. Ш.^{1*}, Горбов С. Н.^{2,1}, Сальник Н. В.^{1,2}, Цымерская К. А.², Пиняев А. В.¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

²Научно-технологический университет «Сириус» (НТУ «Сириус»),

Федеральная территория Сириус, Россия

Giman95@yandex.ru*, gorbow@mail.ru, n.salnik.w@yandex.ru, krichtinaskip@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3758-659X, 0000-0002-0174-1631, 0000-0001-7840-365X,
0009-0001-9534-6199

Аннотация

В работе представлен аналитический обзор современных технологий озеленения крыш как одного из ключевых элементов природно-ориентированных решений, направленных на повышение экологической устойчивости городской среды. Цель исследования заключалась в систематизации современных представлений о классификации, историческом развитии, конструктивных особенностях, свойствах субстратов, растительном ассортименте и региональной адаптации технологий зеленых крыш. Исследование выполнено на основе анализа отечественной и зарубежной научной литературы, нормативно-технических документов (ГОСТ Р 58875-2020, рекомендации FLL) и результатов исследований, опубликованных в период 1992–2025 гг. Рассмотрены основные типы озелененных крыш, их конструктивные элементы, принципы формирования специализированных субстратов и современные подходы к подбору растительного ассортимента. Проанализированы инженерные и экологические функции зеленых крыш, включая регулирование поверхностного стока, снижение тепловой нагрузки на здания, смягчение эффекта городского острова тепла и повышение биоразнообразия городской среды. Особое внимание уделено гибридным технологиям, объединяющим озеленение с системами накопления дождевой воды и солнечной энергетикой, а также вопросам адаптации конструктивных решений и растительных сообществ к климатическим условиям Российской Федерации. Показано, что эффективность зеленых крыш определяется

комплексным взаимодействием инженерных решений, свойств субстрата и адаптированного растительного покрова, а дальнейшее развитие технологии связано с разработкой регионально ориентированных моделей проектирования, учитывающих природно-климатические особенности территорий.

Ключевые слова

Искусственные почвы; растения зеленых крыш; структура зеленых крыш; зеленая инфраструктура; управление ливневыми стоками; устойчивое развитие городов.

Введение

В условиях стремительной глобальной урбанизации естественные ландшафты замещаются непроницаемыми поверхностями с высокой теплоемкостью, что приводит к возникновению эффекта городского острова тепла и нарушению естественного водного цикла (Kim, 1992; Мягков, 2006; Rizwan, Dennis, 2008; Безуглова et al., 2012, 2022; Heaviside et al., 2017; Гинзбург, Докукин, 2021; Локощенко, Енукова, 2021; Горбов, Безуглова, 2022; Kasimov et al., 2024; Константинов и др., 2025). В современном мире строительство зеленых крыш рассматривается не просто как декоративный элемент, а как высокотехнологичное «экосистемное оборудование» и критически важный компонент природно-ориентированных решений (Nature-Based Solutions).

Зеленая крыша представляет собой сложную многослойную инженерно-биологическую систему, которая объединяет вегетационный слой, специально подобранный субстрат, дренажную систему и гидроизоляционную мембрану (FLL, 2018; Cascone, 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). Эти конструкции выполняют широкий спектр функций от децентрализованного управления ливневыми стоками (удерживая до 40-60 % в среднем, до ~80 % в благоприятных условиях годового объема осадков) до существенного снижения энергопотребления зданий за счет пассивного охлаждения в летний период (Getter, Rowe, 2006; Mentens et al., 2006; Shao, Kim, 2022).

Историческая траектория развития этой технологии прошла путь от примитивных дерновых крыш древности и террасных садов Ренессанса до стандартизированных инженерных систем XXI века. Современная классификация разделяет озелененные крыши на три основных типа, исходя из

мощности субстрата и интенсивности ухода (экстенсивный, полуинтенсивный и интенсивный).

Несмотря на то, что современные стандарты (такие как рекомендации FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, Научно-исследовательское общество по развитию ландшафта и ландшафтному строительству)) во многом базируются на европейском опыте умеренного климата, глобальное внедрение технологии требует глубокой адаптации к региональным особенностям, включая экстремальные температуры, влажность и специфику местной флоры (Philippi, 2008; FLL, 2018).

Объекты и методы

Настоящая работа представляет собой аналитический обзор и основана на сравнительно-аналитическом методе, включающем систематизацию, синтез и обобщение литературных данных. Объектом анализа выступают технологии озеленения крыш как многослойные инженерно-биологические системы, а также их классификация, конструктивные элементы, растительный ассортимент и экосистемные функции в условиях городской среды.

Источниками информации послужили публикации в рецензируемых журналах, монографии, материалы научных конференций, нормативно-технические документы (ГОСТ Р 58875-2020); рекомендации FLL по проектированию, устройству и содержанию озеленяемых крыш), а также отраслевые и технические руководства производителей систем озеленения. Поиск литературы проводился в международных и отечественных базах данных (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, MDPI, PubMed, Google Scholar, ResearchGate, eLIBRARY/РИНЦ) с использованием ключевых слов на русском и английском языках («green roof»/«зелёная крыша», «extensive green roof», «intensive green roof», «green roof substrate», «drainage layer», «stormwater retention», «urban heat island», «Sedum», «green roof vegetation», «biosolar roof», «blue-green roof», «green roof biodiversity», «FLL guideline») и их комбинаций (например, «green roof + substrate + organic matter», «green roof + stormwater retention», «extensive green roof + vegetation + climate»).

Временной охват составил 1992–2025 гг. с акцентом на работы 2015–2025 гг., отражающие современное состояние технологии; при этом для реконструкции исторической эволюции привлекались более ранние источники и работы по истории архитектуры. Критерии отбора предусматривали

приоритет оригинальных исследований, систематических обзоров и метаанализов, содержащих экспериментальные или мониторинговые данные (лабораторные, натурные и полевые наблюдения), а также действующих нормативных документов. Основным критерием релевантности являлась направленность публикации непосредственно на технологии озеленения крыш – их классификацию, конструктивные решения, гидрологические и теплофизические функции, свойства субстратов и подбор растительного ассортимента, включая аспекты региональной (в том числе климатической) адаптации.

Анализ данных проводился по тематическим блокам, соответствующим структуре обзора: (1) терминология и классификация озеленённых конструкций; (2) историческая эволюция технологии; (3) конструктивные элементы и материалы (гидроизоляция, корнезащита, дренажные, фильтрующие и влагонакопительные слои, субстрат); (4) растительный ассортимент и его экологические функции; (5) региональная адаптация технологии к контрастным климатическим условиям. Отдельное внимание уделялось критической оценке противоречивых и разнородных данных - в частности, расхождению результатов лабораторных и натурных исследований, различиям в классификационных порогах и нормативных требованиях разных стран, а также изменению свойств субстратов, дренажных и фильтрующих материалов в ходе длительной эксплуатации. Всего проанализировано более [N] источников, из которых [n] ключевых работ вошли в список литературы.

Классификация озелененных конструкций

Классификация озелененных конструкций развивается на стыке ландшафтной архитектуры, экологии и строительной инженерии (Adesoji, Pearce, 2024).

Наиболее распространенным критерием классификации является мощность субстрата. По этому признаку выделяют три основных типа озелененных крыш: экстенсивный, полуинтенсивный и интенсивный (рис. 1, табл. 1) (ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Adesoji, Pearce, 2024).



Рис. 1 — Классификация зеленых крыш

Таблица 1 — Сводные параметры различных типов зеленых крыш

Параметр	Экстенсивная кровля	Полуинтенсивная кровля	Интенсивная кровля
Мощность субстрата	90–150 мм	150–300 мм	> 300 мм
Вес (насыщенный)	60–150 кг/м ²	150–200 кг/м ²	200–500 кг/м ²
Основные формы	Суккуленты, мхи, седумы	Злаки, травы, мелкие кустарники	Кустарники, деревья, газоны
Обслуживание	Минимальное (1–2 раза в год)	Периодическое	Регулярное
Ирригация	Обычно не требуется	Возможна (по необходимости)	Обязательна

Экстенсивные крыши ориентированы на экологический эффект при минимальных затратах на эксплуатацию (Adesoji, Pearce, 2024; Philippi, 2025).

Как правило, мощность субстрата здесь 90–150 мм, что ограничивает использование видов с выраженной вторичной аллоризной корневой системой и растений, требовательных к стабильному увлажнению (ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Shahmohammad et al., 2022). Масса субстрата в состоянии полного водонасыщения обычно составляет 60–150 кг/м², именно поэтому экстенсивные кровли чаще рассматриваются как наиболее подходящий вариант для промышленной и коммерческой застройки, а также для реконструкции существующих зданий (Zhang, 2023; Adesoji, Pearce, 2024). В качестве растительного ассортимента в таких системах используются стресс-толерантные виды, способные долго сохранять жизнеспособность при дефиците влаги и питательных веществ и поддерживать себя за счет вегетативного размножения (ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Kader et al., 2022).

Интенсивное озеленение дает максимальную свободу с точки зрения ландшафтных сценариев, но ограничениями становятся нагрузка на конструкции и стоимость эксплуатации (Pérez-Urrestarazu et al., 2015; Zhang, 2023). Мощность субстрата такой крыши составляет не менее 300 мм (ГОСТ Р 58875-2020, 2020). На интенсивных кровлях как правило создаются полноценные сады и парки с использованием деревьев, крупных кустарников в сочетании с газонными покрытиями, по сути представляя собой наземный парк, поднятый на крышу (Pérez-Urrestarazu et al., 2015; Shahmohammad et al., 2022; Vitaliano et al., 2024). Масса водонасыщенных слоев часто оценивается в 200–500 кг/м² и выше, поэтому несущая способность кровли и закладка усиления на стадии проектирования становятся принципиальными (Zhang, 2023). Интенсивное озеленение дает максимальную свободу планировки, но ограничениями становятся нагрузка на конструкции и стоимость эксплуатации, однако климатические и микроклиматические факторы (ветер, перегрев субстрата, дефицит влаги) все равно остаются значимыми.

Полуинтенсивные системы с мощностью субстрата не менее 150 мм и не более 300 мм, занимают промежуточное положение между экстенсивными и интенсивными (ГОСТ Р 58875-2020, 2020). В отличие от экстенсивных зеленых крыш обслуживание становится регулярнее, а полив является желательным в засушливые периоды (Irga et al., 2023; Manouchehri et al., 2024). За счет увеличения мощности субстрата расширяется и спектр растительного ассортимента, полуинтенсивные зеленые крыши позволяют формировать разнообразные сообщества на основе злаков, многолетних трав и мелких кустарников (Pérez-Urrestarazu et al., 2015; Manouchehri et al., 2024). Нередко подбираются виды, типичные для луговых и степных сообществ, что повышает

экологическую вариативность и декоративность (Wang et al., 2020; Kiran et al., 2025).

Отдельным направлением являются гибридные крыши, совмещающие озеленение с энергетическими и водными функциями. Интерес к гибридным системам особенно заметен в городах, где одновременно важны энергоэффективность, обеспечение оптимального водного режима и качества среды. Данные задачи мотивируют развитие биосолярных и сине-зеленых крыш.

Биосолярные крыши обычно описывают как сочетание фотоэлектрических панелей и озеленения. Синергетический эффект проявляется в охлаждении панелей за счет транспирации, что может повышать их КПД на 1–10 %, а сами панели создают микрозоны с различной освещенностью и затенением, которые, в свою очередь, поддерживают более высокое биоразнообразие (Lamnatou, Chemisana, 2015; Schindler et al., 2016).

Сине-зеленые крыши проектируются с приоритетом удержания и перераспределения воды. В отличие от классических зеленых крыш, такие системы включают накопительный слой, способный удерживать значительные объемы воды под субстратом для последующего капиллярного орошения растений или для замедленного сброса в ливневую канализацию (Shahmohammad et al., 2022; Richter, Dickhaut, 2023).

В настоящее время озелененные конструкции рассматриваются не как декор, а как элементы городской инфраструктуры с динамической функцией, по сути, как разновидность экосистемного оборудования, которое можно проектировать, настраивать и оценивать по эффективности (Shao, Kim, 2022).

Классификация озеленённых конструкций позволяет определить инженерные ограничения при использовании данной технологии и возможный спектр выполняемых экосистемных функций. При этом сама технология зелёных кровель формировалась постепенно через несколько этапов развития. В связи с этим ниже кратко рассмотрена эволюция зелёных кровель и те функции, которые сегодня рассматриваются как наиболее значимые в контексте развития зеленой инфраструктуры.

Историческое развитие зеленых кровель

Историческая траектория развития зеленых кровель представляет собой многовековую эволюцию от примитивных утилитарных конструкций, продиктованных климатической необходимостью, к высокотехнологичным инженерным системам, интегрированным в городскую инфраструктуру (Jim,

2017a; Kader et al., 2022). Развитие технологий зеленых крыш происходило поэтапно под влиянием климатических условий, ограниченности строительных материалов и возрастающей антропогенной нагрузки на городскую среду (Kader et al., 2022; Bellini et al., 2024).

На основании опубликованных исследований историю развития технологий зеленых крыш можно условно разделить на четыре этапа: древний мир, средневековье, период промышленной революции и современный этап системного проектирования (рис. 2) (Popov et al., 2019).

Историческое развитие зеленых кровель

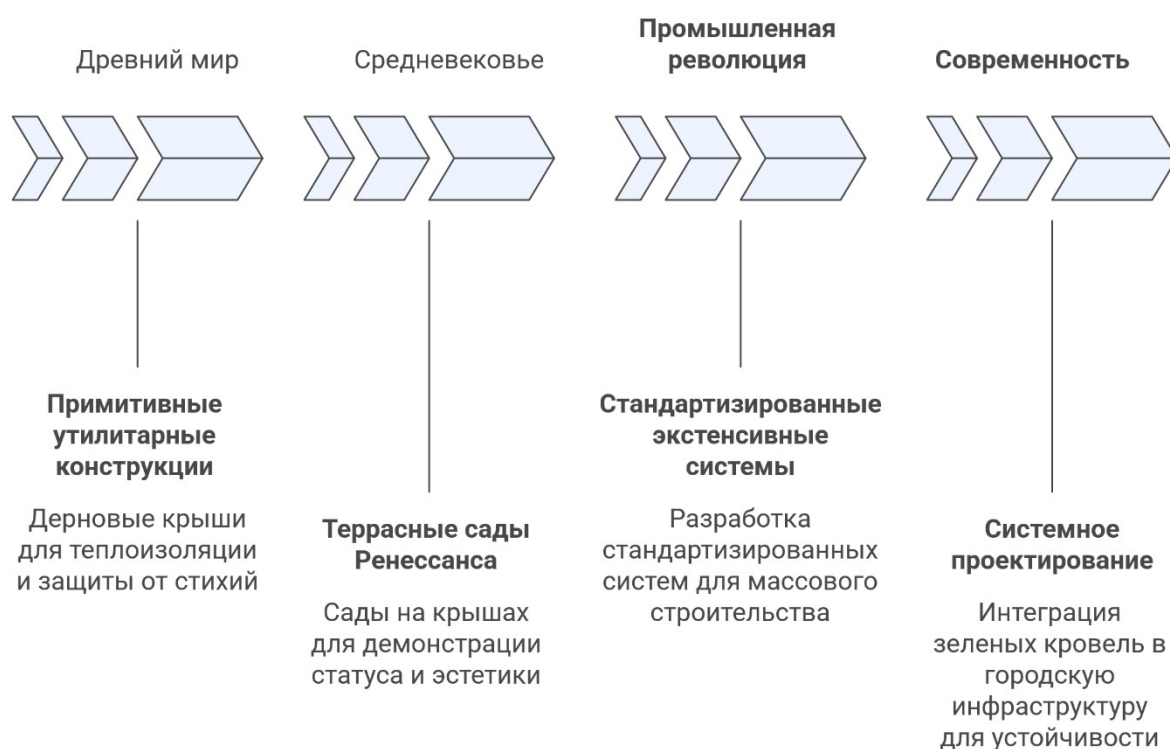


Рис. 2 — Этапы развития зеленых крыш

На каждом из них изменялись конструктивные решения и назначение озелененных кровель. Если первоначально дерновые крыши использовались для теплоизоляции и защиты зданий, то позднее появились террасные сады эпохи Возрождения, выполнявшие преимущественно декоративные функции. В XX веке развитие инженерных технологий привело к созданию стандартизированных систем, ориентированных на решение экологических задач и повышение устойчивости городской среды (Oberndorfer et al., 2007; Elpiniki et al., 2009; Jim, 2017a). Изменение конструктивных решений на разных этапах отражало не только технические возможности своего времени, но и меняющиеся общественные запросы.

В XXI веке зеленые крыши стали одним из инструментов повышения экологической устойчивости городов. Их применение способствует снижению интенсивности эффекта городского острова тепла, регулированию поверхностного стока и сохранению городского биоразнообразия (Kader et al., 2022; Li et al., 2024; Xie et al., 2024). По данным отраслевых исследований, мировой рынок этих конструкций демонстрирует устойчивый рост, что отражает их интеграцию в экономические модели устойчивого строительства (Ngan, 2004; Rizzo et al., 2023).

Первые упоминания целенаправленного размещения растительности на искусственных сооружениях относятся к четвертому тысячелетию до н. э. в Месопотамии (Magill et al., 2011). Зиккураты (ступенчатые башни-храмы) древнего Шумера, включая сооружение в Уре (около 2113 г. до н. э.), представляли собой террасные структуры, на которых, по толкованию археологических данных, могли размещаться растения (Porov et al., 2019). Эти сооружения сочетали религиозные функции с попыткой имитации горных ландшафтов в условиях плоских аллювиальных равнин (Jim, 2017a; Porov et al., 2019). Хотя прямые доказательства системного озеленения остаются ограниченными, именно в этот период формируется идея террасного освоения высоты.

В Древнем Египте битум использовался не только для мумификации, но и для гидроизоляции строительных конструкций, включая покрытия крыш, полов и ёмкостей для хранения воды и зерна. Битум также применялся в судостроении для герметизации лодок и защиты древесины от гниения (Coppa, 1999). Эти технологические решения впоследствии оказали влияние на развитие кровельных систем.

Традиционно в исторической литературе в качестве раннего примера многоуровневого озеленения упоминаются Висячие сады Вавилона (около 600 г. до н. э.) (Ngan, 2004; Porov et al., 2019). Несмотря на дискуссионность, описания античных авторов позволяют восстановить сложную структуру этой прото-интенсивной кровли. Сады формировались в виде последовательно расположенных уровней, образующих четырёхступенчатую структуру, общие размеры которой в плане достигали приблизительно 120×120 м (Wonders, 2016; Porov et al., 2019). Конструктивной основой служили массивные каменные террасы. По своему архитектурному решению они напоминали ступенчатые или амфитеатральные структуры, где каждый последующий уровень опирался на систему перекрытий и несущих элементов (Wonders, 2016). Предполагается, что такая схема обеспечивала удержание массивного почвенного слоя,

достаточное для роста крупных деревьев, и подачу воды с помощью подъемных механизмов, скрытых в колоннах труб (Popov et al., 2019). В качестве прототипа интенсивной кровли этот пример важен прежде всего принципом многослойности и управлением водоподачей.

В Древней Греции и Риме традиция кровельного озеленения получила более практическое развитие. Плоские крыши и террасы использовались для размещения соляриев и садов с горшечными растениями и кустарниками (Popov et al., 2019). Археологические находки в Помпеях и Геркулануме фиксируют наличие озелененных пространств на верхних уровнях построек (Popov et al., 2019; Stater, 2019).

Римская архитектурная мысль рассматривала озеленение кровель как средство смягчения жаркого климата (Magill et al., 2011). Мавзолей Августа в Риме (28 г. до н. э.) имел террасную структуру, где, согласно описаниям, были высажены кипарисы вечнозеленые (*Cupressus sempervirens* L.), что создавало эффект живого памятника (Magill et al., 2011; Popov et al., 2019). В этот период формируется понимание эстетической и психологической ценности таких конструкций (Elpiniki et al., 2009).

Параллельно подобные решения фиксируются в Китае эпохи династии Тан, где террасные сады подчеркивали гармонию архитектуры и природного ландшафта (Huang et al., 2024)

В северных регионах Европы зеленые кровли формировались преимущественно как ответ на суровый климат и дефицит древесины (Jim, 2017a; Stater, 2019). Скандинавская дерновая крыша (torvtak) представляет собой пример устойчивого использования локальных материалов (Drange et al., 1992). Конструкция включала деревянное основание, многослойную березовую кору в качестве гидроизоляции и дерновый слой толщиной 15–20 см (Drange et al., 1992; Gullbrekken et al., 2016). Масса дернового покрытия выполняла не только изоляционную, но и конструктивную функцию, уплотняя бревенчатые стены (Drange et al., 1992; Gullbrekken et al., 2016). Здесь впервые проявляется принцип интеграции биологического и конструктивного слоев в единую функциональную систему.

В Исландии дерновые дома стали доминирующим типом жилья, сохраняя тепло даже в самые суровые зимы (Van Hoof, Van Dijken, 2008). Помимо теплоизоляции, эти кровли обеспечивали огнестойкость, защиту от сильного ветра и символизм (Oberndorfer et al., 2007; Van Hoof, Van Dijken, 2008). С инженерной точки зрения арктические дерновые системы можно рассматривать как предшественников современных экстенсивных кровель (Jim, 2017a).

В эпоху Возрождения в Италии и Франции кровельные сады стали неотъемлемым элементом дворцовой архитектуры (Elpiniki et al., 2009; Popov et al., 2019). Вилла Медичи во Флоренции и сады замка Изола-Белла на озере Маджоре демонстрировали высочайший уровень мастерства в создании многоуровневых террасных садов (Popov et al., 2019; Filonenko et al., 2020). В этот период акцент сместился с утилитарной функции на эстетическую и рекреационную.

Инженерные решения того времени стали более сложными. Использовались массивные каменные своды и усиленные фундаменты для выдерживания веса грунта и воды (Jim, 2017a). В эпоху Ренессанса в Генуе широкое распространение получили террасные сады, устройство которых было обусловлено сложным рельефом городской территории (Magill et al., 2011).

В России традиция устройства озелененных кровель получила развитие как в народном строительстве, так и в архитектуре дворцовых комплексов. В XVII веке на территории Московского Кремля были созданы верховые сады, размещенные на свинцовых поддонах, где выращивали цветы и плодовые деревья (Magill et al., 2011; Popov et al., 2019). Одновременно в северных районах страны широкое распространение получили дерновые кровли, которые использовали для защиты зданий от промерзания (Popov et al., 2019; Filonenko et al., 2020). Такое разнообразие конструктивных решений говорит о том, что развитие озелененных крыш в России определялось не только практическими потребностями строительства, но и особенностями архитектурных традиций.

Начало промышленной революции в XIX веке привело к временному снижению интереса к зеленым кровлям (Jim, 2017b). Появление доступных кровельных материалов (листовой металл, шифер и рулонные гидроизоляционные покрытия) постепенно вытеснило традиционные способы устройства зеленых крыш (Jim, 2017a; Cárdenes et al., 2019). Вместе с тем рост городского населения и уплотнение застройки способствовали возобновлению интереса к озеленению (Elpiniki et al., 2009; Popov et al., 2019).

Вторая половина XIX века ознаменовалась вторым рождением зеленой технологии (Filonenko et al., 2020). В 1867 году на Всемирной выставке в Париже немецкий мастер-строитель Карл Рабиц представил модель плоской крыши, на которой был разбит сад (Elpiniki et al., 2009; Jim, 2017b; Abass et al., 2020). Рабиц предложил использовать облегченные конструкции, что сделало сады на крышах доступными не только для аристократии, но и для среднего класса (Elpiniki et al., 2009; Popov et al., 2019). Это стало шагом к массовой адаптации технологии.

В 1880-х годах в Берлине и других городах Германии начался бум урбанизации. Дома часто строились с использованием дешевого, но крайне пожароопасного каменноугольного дегтя в качестве гидроизоляции. Кровельщик Х. Кох разработал метод снижения пожарного риска. Он покрывал дегтярный слой песком и гравием. Научный интерес представляет тот факт, что эти гравийные крыши со временем колонизировались семенами местных трав и мхов, превращаясь в полноценные зеленые ковры (Getter, Rowe, 2006). В 1980 году исследователи обнаружили, что около 50 таких крыш Коха все еще функционировали и оставались полностью водонепроницаемыми спустя почти 100 лет эксплуатации (Getter, Rowe, 2006). Это стало научным доказательством того, что растительность и субстрат защищают гидроизоляционную мембрану от ультрафиолетового излучения и резких температурных колебаний, продлевая ее жизнь более чем в два раза (Elpiniki et al., 2009).

В XX веке идеи модернизма усилили интерес к крышам-садам. Ле Корбюзье рассматривал их как обязательный элемент современной архитектуры (Jim, 2017b; Bellini et al., 2024), связывая с компенсацией застройки природной территории (Ngan, 2004; Getter, Rowe, 2006). Применение железобетона сделало такие решения конструктивно возможными (Jim, 2017a; Bellini et al., 2024).

Современный этап развития зеленых кровель начался в Западной Германии в 1960-х годах (Manso, Castro-Gomes, 2015; Jim, 2017b). Это было обусловлено экологическим кризисом в городах, необходимостью управления ливневыми стоками и поиском долговечных кровельных решений (Bellini et al., 2024; Xie et al., 2024). Немецкие исследователи заложили научные основы проектирования субстратов и анализа водного баланса (Mentens et al., 2006; Czemieli Berndtsson, 2010; Shafique et al., 2016; FLL, 2018).

В 1970-х годах произошел переход к стандартизированным инженерным системам (Elpiniki et al., 2009). Появление противокорневых мембран и облегченных минеральных субстратов существенно повысило надежность и долговечность таких конструкций (Manso, Castro-Gomes, 2015). Важную роль в дальнейшем развитии технологии сыграла деятельность FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, Научно-исследовательское общество по развитию ландшафта и ландшафтному строительству), подготовившего в 1982 году первые рекомендации по проектированию и устройству зеленых крыш. Последующее совершенствование этих рекомендаций способствовало унификации

требований к конструкции, материалам и эксплуатации озелененных кровель (Oberndorfer et al., 2007; Dvorak, 2011; FLL, 2018).

К началу XXI века площадь озелененных кровель в Германии достигла нескольких миллионов квадратных метров, что отражало широкое распространение этой технологии в строительной практике (Ngan, 2004; Getter, Rowe, 2006). Разработанные нормативные документы получили признание за пределами страны и впоследствии были использованы при формировании национальных стандартов в США, Великобритании и ряде других государств (Scholz-Barth, Tanner, 2004; Dvorak, 2011; Magill et al., 2011).

Сегодня зеленые кровли рассматриваются как обязательный элемент устойчивой архитектуры, интегрированной в климатическую политику городов. Историческая эволюция технологии демонстрирует постепенный переход от эмпирического опыта к научно обоснованному проектированию, что и определило современную типологию экстенсивных и интенсивных систем.

Конструкция и компоненты современных систем озеленения крыш

Современная зеленая крыша формируется как многослойная система, в которой каждый элемент одновременно решает инженерные и биологические задачи. Согласно ГОСТ Р 58875-2020 и рекомендациям FLL, стандартная конструкция включает восемь основных функциональных элементов, не считая несущей конструкции (рис. 3) (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020).



Рис. 3 — Строение зеленой крыши

Несмотря на единство базовых принципов построения озелененных кровель, российский стандарт ГОСТ Р 58875-2020 и рекомендации FLL различаются степенью детализации требований к отдельным конструктивным элементам, свойствам субстратов и особенностям проектирования. Сравнительная характеристика документов представлена в табл. 2.

Представленное сравнение показывает, что ГОСТ Р 58875-2020 ориентирован преимущественно на нормативное регулирование проектирования, строительства и эксплуатации озелененных крыш, тогда как рекомендации FLL содержат более детализированные требования к свойствам субстратов, функциональным характеристикам конструктивных слоев, гидрологическим процессам и биологическим компонентам системы. Это обеспечивает возможность адаптации конструктивных решений к различным условиям эксплуатации и объясняет широкое применение рекомендаций FLL в международной практике проектирования озелененных кровель.

Таблица 2 — Сравнительная характеристика требований ГОСТ Р 58875-2020 и рекомендаций FLL к проектированию озелененных крыш

Критерий	ГОСТ Р 58875-2020 (Россия, 2020)	FLL Green Roof Guidelines (Германия, 2018)
Область применения	Проектирование, строительство и эксплуатация озеленяемых и эксплуатируемых крыш на территории Российской Федерации	Проектирование, устройство и эксплуатация озелененных крыш различного назначения
Назначение документа	Нормативно-технический стандарт, устанавливающий обязательные требования	Инженерно-техническое руководство, основанное на современных научных исследованиях и практическом опыте проектирования и эксплуатации
Классификация зеленых крыш	Интенсивные, полунинтенсивные и экстенсивные, также выделяются мобильные и стационарные системы. Классификация основана на конструктивных особенностях и мощности субстрата	Интенсивные, упрощенные интенсивные (simple intensive) и экстенсивные системы. Классификация основана на характере озеленения и особенностях эксплуатации
Мощность субстрата	Для каждого типа крыши установлены рекомендуемые диапазоны мощности субстрата	Жесткие нормативы отсутствуют. Мощность определяется требованиями растительности, функциональным назначением кровли и условиями эксплуатации

Требования к субстрату	Регламентируются группы субстратов и их компонентов, допустимые материалы, плотность, гранулометрический состав, содержание органического вещества, усадка, водопроницаемость, предельная влагоемкость, объем воздушных пор, pH, содержание солей, питательных веществ, тяжелых металлов, пестицидов, радионуклидов и патогенных микроорганизмов.	Регламентируются группы субстратов и их компонентов, гранулометрический состав, содержание органического вещества, объемная масса, pH, электропроводность, воздухоемкость, водоудерживающая способность, водопроницаемость, содержание питательных веществ, солей и загрязняющих веществ, а также методы лабораторных испытаний субстратов.
Требования к содержанию органического вещества	Устанавливаются требования к составу субстрата, однако предельные значения содержания органического вещества не нормируются.	Устанавливаются предельные значения содержания органического вещества для различных конструкций субстрата
Требования к дренажному слою	Регламентируются материалы, требования к устройству, водоотводящей способности и размещению дренажного слоя в конструкции кровли	Детально регламентируются материалы, дренирующая и водоудерживающая способность, прочность и долговечность дренажных элементов
Требования к влагонакопительному слою	Рассматривается как один из конструктивных элементов системы	Подробно регламентируются материалы, способы накопления воды и требования к водоудерживающей способности элементов.
Требования к фильтрующему слою	Устанавливаются требования к размещению фильтрующего слоя в конструкции; в качестве основного материала предусматривается применение фильтрующего геотекстиля.	Детально регламентируются требования к фильтрационной способности, водопроницаемости, долговечности, механической прочности и предотвращению заиливания
Требования к растительному ассортименту	Общие требования к посадочному материалу и его совместимости с условиями эксплуатации.	Детальные рекомендации по выбору растений в зависимости от глубины субстрата, климатических условий и назначения крыши
Требования к водоотведению	Рассматриваются общие требования к отводу дождевых вод	Выполняется расчет коэффициента стока, водоудержания и пропускной способности системы

Базовым элементом системы служит гидроизоляционный слой, от характеристик которого напрямую зависит долговечность всей конструкции (Fishburn, 2006). В качестве материалов обычно применяются полимерные мембраны (ПВХ, ТПО, ЭПДМ) или многослойные битумно-полимерные покрытия (Fishburn, 2006; FLL, 2018; Cascone, 2019). Непосредственно над гидроизоляцией располагается корнезащитный слой, предотвращающий деструктивное воздействие корней на кровельные материалы (FLL, 2018; Cascone, 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). Отсутствие этого слоя является одной из ведущих причин преждевременного выхода кровли из строя, так как корни растений способны проникать в микротрещины и швы, разрушая герметичность системы (Fishburn, 2006; Oberndorfer et al., 2007). Корнезащита выполняется из плотных полимерных пленок (HDPE) или специализированных мембран с антикорневыми химическими добавками (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020).

Защитный слой предохраняет гидроизоляцию от механических повреждений в процессе монтажа и эксплуатации, а также может выполнять функцию дополнительного удержания влаги (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). Часто он совмещается с влагонакопительным слоем, изготовленным из нетканого текстиля или синтетических волокон, способных удерживать воду и постепенно отдавать ее растениям через капиллярный подъем (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020 Richter, Dickhaut, 2023).

Дренажный слой играет важную роль в гидравлической системе. Его задача заключается в быстром отводе избыточной воды для исключения заболачивания субстрата и обеспечения аэрации корней (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Richter, Dickhaut, 2023). Выделяют три вида дренажа гравийный, модульный и дренажные маты. В первом используют пористые минеральные материалы, такие как керамзит, пемза, дробленый кирпич или вспученный сланец (Cascone, 2019; Richter, Dickhaut, 2023). Эти материалы обеспечивают высокую пропускную способность и сами способны удерживать часть влаги внутри пор (Cascone, 2019; Richter, Dickhaut, 2023). В модульном дренаже применяют профилированные панели из полиэтилена или полистирола с ячеистой структурой (Cascone, 2019; ZinCo USA, 2019). Ячейки позволяют аккумулировать воду для периодов засухи, а перфорация в верхней части панелей обеспечивает вентиляцию корневой системы (Cascone, 2019). Дренажные маты представляют собой гибкие рулонные материалы, изготовленные из нетканых или хаотично переплетённых синтетических волокон. Благодаря своей структуре они одновременно выполняют функции разделительного, дренажного и защитного слоёв, что позволяет сократить

количество конструктивных элементов и значительно упростить монтаж (Fishburn, 2006; Kelly, 2006; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). Использование дренажных матов обеспечивает формирование одной из наиболее тонких и лёгких кровельных систем. Вместе с тем их водоаккумулирующая и дренирующая способность уступает традиционным насыпным материалам и модульным дренажным элементам. По этой причине подобные системы преимущественно применяются на скатных кровлях, где использование плитных или насыпных дренажных материалов затруднено или технически нецелесообразно (Kelly, 2006; Cascone, 2019; ZinCo USA, 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). Сравнительная характеристика наиболее распространённых материалов дренажного слоя, включая их плотность, преимущества и недостатки, приведена в табл. 3. Дренаж формирует основу водного режима системы. Однако его стабильная работа невозможна без слоя, предотвращающего миграцию мелких частиц.

Таблица 3 — Характеристика материалов дренажного слоя зеленых крыш

Материал дренажа	Плотность (кг/м³)	Преимущества	Недостатки
Керамзит	300–600	Естественный материал, долговечность	Большой вес при насыщении
Пемза / Лапилли	400–800	Высокая пористость и влагоемкость	Редкость в некоторых регионах
Дробленый кирпич	800–1200	Использование вторсырья	Риск химического выщелачивания
Модульные панели	15–25 кг/м²	Малый вес, высокая емкость воды	Чувствительность к УФ до засыпки

Влагонакопительный (водонакопительный) слой предназначен для аккумуляции атмосферных осадков с последующим постепенным обеспечением растений водой в периоды дефицита влаги (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). В зависимости от конструктивного решения накопление влаги может обеспечиваться несколькими способами. Наиболее простым вариантом является использование субстратов с высокой водоудерживающей способностью, содержащих пористые минеральные компоненты или специальные субстратные плиты (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Peng et al., 2023). В более сложных системах водонакопление осуществляется отдельным слоем, представленным накопительными матами или профилированными панелями, размещаемыми под фильтрующим слоем (FLL, 2018; ZinCo USA, 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). Широкое распространение

получили также комбинированные дренажно-водонакопительные элементы, одновременно обеспечивающие отвод избыточной влаги и формирование её эксплуатационного запаса, доступного для корневой системы растений (FLL, 2018; Cascone, 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Richter, Dickhaut, 2023).

В качестве материалов влагонакопительного слоя применяются синтетические геотекстильные маты, маты из минеральной ваты, профилированные полимерные панели, а также пористые минеральные материалы (FLL, 2018; Cascone, 2019; ZinCo USA, 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). Выбор способа накопления воды определяется типом озеленения. Для интенсивных крыш наиболее эффективным считается использование дренажно-водонакопительных элементов с регулируемым подпором воды, тогда как для экстенсивных систем подобное решение применяется ограниченно, поскольку продолжительное подтопление может отрицательно влиять на растения-суккуленты, адаптированные к периодическому дефициту влаги (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Richter, Dickhaut, 2023).

Фильтрующий слой, располагающийся между субстратом и влагонакопительным слоем, обычно выполняется из нетканого геотекстиля (Philippi, 2008; Cascone, 2019; Szlachetka et al., 2025). Его ключевой ролью является предотвращение миграции мелких частиц субстрата в дренажную полость, что препятствует ее заиливанию (FLL, 2018; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Peng et al., 2023).

Субстрат для зеленых крыш – искусственная минеральная смесь с ограниченной долей органики, оптимизированная по массе и пористости (Peng et al., 2023). Применение обычного садового грунта в кровельных системах, как правило, не рекомендуется, поскольку он отличается высокой массой, склонностью к уплотнению и потере аэрационных свойств (Philippi, 2008).

Согласно рекомендациям FLL, содержание органического вещества рассматривается как один из ключевых показателей, определяющих качество субстрата для озеленённых крыш. Предельно допустимые значения зависят как от типа озеленения, так и от конструкции субстрата. Для однослойных систем, используемых на экстенсивных и интенсивных крышах, максимальное содержание органического вещества ограничено 40 г/л. В многослойных конструкциях допустимые значения выше: до 65 г/л для экстенсивных крыш и интенсивных крыш с газонным покрытием и до 90 г/л для интенсивных крыш без газона (табл. 4). Ограничение содержания органики важно для предотвращения усадки субстрата в процессе ее разложения и минимизации вымывания питательных веществ в сточные воды (Philippi, 2008; Osawa et al.,

2025). Как следствие избыточное содержание органической фракции на фоне промывного типа водного режима способствует снижению его структурной устойчивости и в конечном итоге может отрицательно сказаться на эксплуатационных характеристиках озеленённой крыши (FLL, 2018).

Таблица 4 — Максимально допустимое содержание органического вещества в субстратах для озеленённых крыш в соответствии с рекомендациями FLL

Тип озеленённой крыши	Конструкция	Максимальное содержание органического вещества, г/л
Интенсивная (без газонного покрытия)	Однослойная	≤ 40
Интенсивная (без газонного покрытия)	Многослойная	≤ 90
Интенсивная (с газонным покрытием)	Однослойная	≤ 40
Интенсивная (с газонным покрытием)	Многослойная	≤ 65
Экстенсивная	Однослойная	≤ 40
Экстенсивная	Многослойная	≤ 65

Таким образом, принимая во внимание рекомендации различных стандартов и литературных источников, посвященных проектированию и оценке субстратов для озелененных крыш, можно констатировать, что ключевыми параметрами субстратов, используемых при оценке корнеобитаемого слоя зеленых крыш, могут выступать:

1. Общая пористость должна составлять 40-65 % для обеспечения водно-воздушного баланса (FLL, 2018).
2. Влагоемкость в целевом диапазоне 40-60 % от объема (Fassman, Simcock, 2012).
3. Водопроницаемость должна обеспечивать беспрепятственное прохождение ливневого потока для предотвращения поверхностного стока (Peng et al., 2023; Frizzi, Drake, 2025).
4. Актуальная кислотность обычно поддерживается в диапазоне 6.0-8.5, что оптимально для большинства кровельных растений (FLL, 2018; Cascone, 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Osawa et al., 2025).

Указанные диапазоны отражают компромисс между способностью системы аккумулировать воду и необходимостью поддержания аэрации корневой зоны.

Помимо свойств материалов, существенное влияние на функционирование системы оказывает геометрия кровли (Fishburn, 2006; FLL,

2018; ZinCo USA, 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020). Плоские крыши являются наиболее распространенным вариантом для озеленения (Mentens et al., 2006; Oberndorfer et al., 2007). Основным риском здесь является застой воды при недостаточном уклоне (менее 0.6° (1-2 %)), что ведет к анаэробным условиям в субстрате и гибели корней (Fishburn, 2006; Czemieli Berndtsson, 2010). При уклонах менее 1.1° (2 %) рекомендуется применение дренажных систем с увеличенной высотой профиля и обязательным использованием фильтрующего текстиля повышенной проницаемости (Fishburn, 2006; Czemieli Berndtsson, 2010; FLL, 2018).

Кроме того, при увеличении уклона возникают сдвигающие силы, стремящиеся сместить всю конструкцию зеленой крыши вниз по скату (Fishburn, 2006; ZinCo USA, 2019). Это требует внедрения систем механической стабилизации и защиты от эрозии (ZinCo USA, 2019). При уклонах $4.6-14.0^\circ$ (8 %-25 %) используются георешетки или ячеистые модули, которые фиксируются на кровле и удерживают субстрат внутри своих ячеек (Getter, Rowe, 2006; FLL, 2018; ZinCo USA, 2019). В таких случаях сдвигающие усилия, как правило, передаются на несущие элементы здания или карнизные упоры (ZinCo USA, 2019). Для крутых крыш (свыше 14.0° (>25 %)) проектируются промежуточные барьеры сдвига, которые делят площадь кровли на сегменты (Getter, Rowe, 2006; FLL, 2018; ZinCo USA, 2019).

На скатных крышах субстрат подвергается интенсивному вымыванию. Для решения этой проблемы применяются предварительно выращенные растительные слои, которые обеспечивают 100 % покрытие поверхности сразу после укладки, связывая субстрат корневой системой (ZinCo USA, 2019; Liao, 2024).

Несмотря на стремление к максимальной стабилизации при создании, зеленые крыши остаются динамической экосистемой, свойства которой неизбежно эволюционируют во времени (Hakimdavar et al., 2014; Frizzi, Drake, 2025;). Игнорирование этих процессов на этапе проектирования может привести к снижению функциональности системы через 5–10 лет (De-Ville et al., 2018; Szlachetka et al., 2025). В процессе многолетней эксплуатации субстрат подвергается физическому и биологическому выветриванию. Наблюдается накопление органического вещества от отмерших корней и атмосферной пыли, что может привести к увеличению влагоемкости, но одновременно к снижению гидравлической проводимости из-за сужения пор (De-Ville et al., 2018; Frizzi, Drake, 2025). Шестилетнее исследование в Шеффилде показало, что потенциальная удерживающая способность вегетирующих крыш увеличилась

на 12 %, в то время как не вегетирующие системы с керамзитом показали снижение эффективности на 45 % из-за уплотнения материала (De-Ville et al., 2018).

Фильтрующий слой является наиболее уязвимым элементом в долгосрочной перспективе. Исследования состояния геотекстиля после пяти лет эксплуатации выявили снижение его пористости на 56 % вследствие внедрения мелких фракций субстрата (Szlachetka et al., 2025). Это подчеркивает необходимость выбора материалов с избыточной пропускной способностью на начальном этапе. Кроме того, седиментация городских взвешенных частиц может вызвать поверхностное засорение субстрата, что приводит к образованию луж и эрозии верхнего слоя (De-Ville et al., 2018; Peng et al., 2023).

На практике масштабное внедрение зеленых крыш по-прежнему ограничено рядом факторов. Основными барьерами являются высокая начальная стоимость (на 15-40 % выше традиционных кровель), отсутствие долгосрочных государственных программ поддержки и дефицит квалифицированных специалистов (Teng et al., 2021; Hamid et al., 2023). Экономическая эффективность зеленых крыш во многом зависит от выбранного временного интервала. При краткосрочном анализе они выглядят затратными, однако в рамках жизненного цикла демонстрируют конкурентоспособность за счет продления ресурса кровли и снижения эксплуатационных расходов (Oberndorfer et al., 2007).

Растительный ассортимент для систем городского озеленения кровель

С морфологической точки зрения для зеленых крыш предпочтительны растения с компактной, но хорошо разветвленной корневой системой (Todeschini, Fett-Neto, 2025). На экстенсивных кровлях корни ограничены вертикально, что заставляет растения осваивать субстрат горизонтально.

Традиционно рынок зеленых крыш ориентирован на использование видов рода *Sedum* (Todeschini, Fett-Neto, 2025). Однако современные экологические требования диктуют необходимость расширения ассортимента для повышения устойчивости городских экосистем (рис. 4) (Calviño et al., 2022; Nevermann et al., 2025). Это связано не только с вопросами декоративности, но и с необходимостью сохранения устойчивости сообществ к климатическим экстремальным характеристикам и биотическим стрессам.



Рис. 4 — Подбор растительного ассортимента зелёных крыш

Род *Sedum* включает около 500 видов, большинство из которых происходит из засушливых и горных районов Северного полушария (Giagnacovo et al., 2025). Исследования в различных климатических условиях (от Средиземноморья до Средней полосы России и США) позволили выделить наиболее перспективные виды и сорта (Getter, Rowe, 2008; Giagnacovo et al., 2025).

Исследования в Центральной Италии показали, что виды очиток белый (*Sedum album* L.), очиток скальный (*Petrosedum rupestre* (L.) P.V.Heath) и очиток очитковидный (*Petrosedum sediforme* (Jacq.) Grulich) демонстрируют отличные показатели выживаемости и динамики покрытия в течение 15 месяцев (Giagnacovo et al., 2025). При этом очиток белый проявил себя как агрессивный распространитель, быстро захватывающий свободное пространство, что делает его идеальным для монокультур или в качестве базового компонента смеси, но требующим контроля в сложных композициях (Giagnacovo et al., 2025). Напротив, розеточные суккуленты, такие как молодило кровельное (*Sempervivum tectorum* L.), демонстрируют более низкую скорость горизонтального роста, но вносят значительный вклад в эстетическое разнообразие (Giagnacovo et al., 2025).

В Северной Каролине (США) были выявлены значительные различия в успехе интродукции популярных очитков (Eriksson et al., 2001; Simmons et al.,

2008). Экспериментальные данные подчеркивают, что даже в пределах одного рода адаптивность видов может радикально варьироваться в зависимости от локального микроклимата и физико-химических свойств субстрата (Eriksson et al., 2001; Simmons et al., 2008; Elkadi et al., 2024).

В регионах с жарким и сухим летом значительный интерес представляют смеси суккулентов из семейства аизовые (Aizoaceae), в частности виды рода делосперма (*Delosperma*) (Di Miceli et al., 2022). При сравнении смесей толстянковых (Crassulaceae) и аизовых (Aizoaceae) были выявлены различия в скорости формирования растительного покрова. Аизовые отличаются более интенсивным горизонтальным ростом на начальных этапах (покрытие 45 % против 36 % у очитков) и достигают более высокого конечного покрытия (87 % против 79 % у очитков) (Di Miceli et al., 2022). Кроме того, для видов Aizoaceae характерна более выраженная и продолжительная фаза цветения, что повышает декоративный эффект кровли (Calviño et al., 2022; Di Miceli et al., 2022).

Для полуинтенсивных и интенсивных зеленых крыш, а также современных экстенсивных систем с улучшенными субстратами вместе с очитками все чаще используют злаки и декоративные травы (Dunnett, Nolan, 2004; Lundholm et al., 2010; Rodríguez, Vilela, 2022). Высокая интенсивность транспирации этих растений способствует более быстрому восстановлению влагоемкости субстрата между выпадениями осадков (Farrell et al., 2013; Kemp et al., 2019).

Исследования при мощности субстрата 10–20 см выделили группу сильнейших видов, способных успешно развиваться без интенсивного полива (Köhler, 2006; Dunnett et al., 2008; Lundholm et al., 2010). Среди злаков были представлены тонконог крупноцветковый (*Koeleria macrantha* (Ledeb.) Schult.), споробол разночешуйный (*Sporobolus heterolepis* (A.Gray) A.Gray), вейник короткохохолковый (*Calamagrostis arundinacea* spp. *brachytricha* (Steud.) Tzvelev). Тонконог крупноцветковый особенно ценен благодаря способности к активному самосеву (Köhler, 2006; Dunnett et al., 2008; Lundholm et al., 2010). В числе травянистых многолетников внимание привлекли кореопсис ланцетный (*Coreopsis lanceolata* L.), далей пурпурная (*Dalea purpurea* Vent.), фиалка стреловидная (*Viola sagittata* Aiton), душевик котовниковый (*Clinopodium nepeta* (L.) Kuntze) (Köhler, 2006; Dunnett et al., 2008; Lundholm et al., 2010). Общей чертой указанных видов является сочетание засухоустойчивости, устойчивости к ветровой нагрузке и способности формировать стабильный травостой при ограниченной мощности субстрата.

Использование видов местных прерий или лугов значительно повышает экологическую ценность кровли и ее устойчивость к региональным климатическим аномалиям (рис. 5) (MacIvor, Lundholm, 2011; Calviño et al., 2022;).

Растения для кровельного озеленения



Рис. 5 — Растительный ассортимент зеленых крыш

Важным концептом является использование покровных культур. В этой роли часто выступают седумы, которые создают благоприятный микроклимат для прорастания семян и развития проростков более чувствительных видов трав и злаков на начальных этапах формирования сообщества (Butler, Orians, 2011; Nagase, Dunnett, 2011; Filazzola, Lortie, 2014).

В условиях России растения на крыше сталкиваются с проблемой глубокого промерзания субстрата зимой и перегрева летом (Титова, 2003; Giagnacovo et al., 2025). Наиболее надежными видами для экстенсивного озеленения в России признаны очиток едкий (*Sedum acre* L.), очиток белый (*S. album*), очиток ложный (*Phedimus spurius* (M.Bieb.)'t Hart), очиток камчатский (*P. kamtschaticum* (Fisch.)'t Hart) и молодило кровельное (*Sempervivum tectorum* L.) (Титова, 2003; Жданова et al., 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Giagnacovo et al., 2025). Для полуинтенсивных систем рекомендуются холодостойкие злаки (овсяница овечья (*Festuca ovina* L.)) и луковичные (лук скорода (*Allium schoenoprasum* L.)), способные переносить циклы замораживания-оттаивания

(Титова, 2003; Жданова et al., 2019; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Rodríguez, Vilela, 2022). На интенсивных крышах в климатических условиях Центральной России наиболее эффективно показали себя морозостойкие деревья и кустарники, такие как клен приречный (Гиннала) (*Acer tataricum* subsp. *ginnala* (Maxim.) Wesm.) и татарский (*Acer tataricum* L.), боярышник колючий (*Crataegus laevigata* (Poir.) DC.), дерен белый (*Cornus alba* L.), ель (колючая (*Picea pungens* Engelm.), канадская (*Picea laxa* (Münchh.) Sarg.) и обыкновенная (*Picea abies* (L.) H.Karst.)), сосна горная (*Pinus mugo* Turra), туя западная (*Thuja occidentalis* L.) и различные виды можжевельников (*Juniperus* spp.) (ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Дьячкова, 2022). Теплолюбивые и экзотические виды (например, клен дланевидный (*Acer palmatum* Thunb.) или плющ обыкновенный (*Hedera helix* L.)) пригодны только для южных регионов, для умеренных и северных широт необходим подбор растений, обладающих исключительной выносливостью и способностью переносить суровые зимы (Титова, 2003; ГОСТ Р 58875-2020, 2020; Дьячкова, 2022).

Формирование растительного ассортимента для зеленых крыш остается сложной задачей, требующей учета физиологических особенностей видов, их водного режима и взаимодействий внутри сообщества. Универсального списка растений не существует, подбор всегда определяется климатом, типом системы и целями проекта. Хотя доминирование рода *Sedum* объясняется их высокой выживаемостью, накопленные данные указывают на перспективность поливидовых сообществ с включением местных злаков и разнотравья для усиления экосистемных функций.

Заключение

Технологии зеленых крыш прошли длительный путь развития от примитивных дерновых покрытий и террасных садов древности до сложных многослойных систем, интегрированных в современную городскую инфраструктуру. Современные зеленые кровли сочетают инженерные, гидрологические и биологические функции, а их внедрение позволяет частично компенсировать последствия урбанизации, связанные с ростом площади непроницаемых покрытий, нарушением естественного водного режима и формированием эффекта городского острова тепла. Одновременно озелененные конструкции способны снижать поверхностный сток, улучшать микроклимат зданий и создавать дополнительные биотопы в условиях плотной городской застройки.

Проведенный анализ показывает, что современная типология зеленых крыш сформировалась как результат постепенной специализации технологии

под различные эксплуатационные задачи. Экстенсивные системы ориентированы прежде всего на экологическую эффективность при минимальной нагрузке на конструкции, тогда как интенсивные кровли фактически представляют собой полноценные озелененные пространства с высокой степенью инженерной сложности. Развитие гибридных решений, включая биосолярные и сине-зеленые системы, отражает переход к более комплексному пониманию функций городской зеленой инфраструктуры, в которой озеленение рассматривается уже не как изолированный элемент благоустройства, а как часть единой системы управления энергией, водой и микроклиматом города.

Эффективность и долговечность зеленых крыш во многом зависят от качества проектирования всех конструктивных элементов. Кровельная система функционирует как единый комплекс, в котором изменение свойств одного слоя отражается на работе остальных компонентов. По мере эксплуатации изменяются характеристики субстрата, дренажного слоя и фильтрующих материалов вследствие физических, химических и биологических процессов. В связи с этим при проектировании зеленых крыш необходимо учитывать не только исходные свойства отдельных материалов, но и их изменение в процессе эксплуатации.

Подходы к формированию растительного ассортимента зеленых крыш существенно изменились. Если первые экстенсивные системы создавались преимущественно с использованием ограниченного числа суккулентных видов рода *Sedum*, то современные исследования направлены на формирование поливидовых растительных сообществ, включающих местные злаки, многолетние травы и виды, характерные для природной флоры региона. Использование такого ассортимента повышает экологическую устойчивость озелененных кровель и способствует лучшей адаптации растений к региональным климатическим условиям.

Несмотря на существование международных нормативных систем и накопленный мировой опыт, вопросы региональной адаптации технологии по-прежнему остаются одними из наиболее значимых. Для условий Европейского Юга России особое значение приобретают проблемы перегрева субстрата в летний период, циклы промерзания и оттаивания, а также необходимость подбора устойчивых субстратов и растительных комбинаций для контрастных климатических условий. В связи с этим дальнейшее развитие технологии зеленых крыш в стране, вероятно, будет связано не столько с прямым

копированием зарубежных решений, сколько с разработкой адаптированных региональных моделей проектирования.

Таким образом, современная зеленая крыша представляет собой не декоративный архитектурный элемент, а полноценную многофункциональную систему, сочетающую инженерные и экологические принципы. По мере усиления климатических и экологических вызовов значение подобных технологий в структуре устойчивого города, по всей видимости, будет только возрастать.

Благодарности и финансирование

Работа выполнена на базе Научно-технологического центра «Генетика и биотехнология растений» Ботанического сада Южного федерального университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», проект № СП-11-26-04.

Список литературы

1. Безуглова О. С., Горбов С. Н., Морозов И. В., Невидомская Д. Г. Урбопочвоведение. 2012. 264 с.
2. Безуглова О. С., Горбов С. Н., Скрипников П. Н. Гумусное состояние почв Ростовской агломерации. 2022. 138 с.
3. Гинзбург А. С., Докукин С. А. Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM) // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. №. 1. С. 53-66. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010053>
4. Горбов С. Н., Безуглова О. С. Почвенный покров Ростовской агломерации. 2022. 186 с.
5. ГОСТ Р 58875-2020. Зеленые стандарты. Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования. 2020. 54 с.
6. Дьячкова О. Н. Организационно-технологическая надежность городских озелененных пространств. Промышленное и гражданское строительство. 2022. С. 61–67. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.07.61-67>.

7. Жданова И. В., Кузнецова А. А., Дорофеева Е. Д. Экологические и эстетические аспекты применения вертикального озеленения и зелёных крыш в жилых зданиях. 2019. 53–59 с.
8. Константинов П. И., Варенцов М. И., Бакланов А. А. Исследования городского климата в Российской Федерации в начале XXI века // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2025. Т. 61. №. 6. С. 833-852. <https://doi.org/10.7868/S3034648725060098>
9. Локощенко М. А., Енукова Е. А. Острова тепла малых городов и деревень Московского региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. №. 2. С. 200-207. <https://doi.org/10.31857/S268673972110011X>
10. Мягков М. С. Экологические последствия мезоклиматических аномалий Московского мегаполиса // Экология урбанизированных территорий. 2006. №. 4. С. 28-34.
11. Титова Н. П. Сады на крышах. Олма-Пресс Гранд, М. 2003. 112 с.
12. Abass F., Ismail L. H., Wahab I. A., Elgadi A. A. A Review of Green Roof: Definition, History, Evolution and Functions. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 713. Article 012048. P. 9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012048>
13. Adesoji T., Pearce A. Interdisciplinary Perspectives on Green Infrastructure: A Systematic Exploration of Definitions and Their Origins. Environments 2024. Vol. 11. Article 8 P. 32. <https://doi.org/10.3390/environments11010008>.
14. Bellini A., Bartoli F., Caneva G. Extensive Green Roofs (EGRs) and the Five Ws: A Quantitative Analysis on the Origin and Evolution, Aims, Approaches, and Botanical Views // Sustainability. 2024. Vol. 16. Article 1033 P. 16. <https://doi.org/10.3390/su16031033>.
15. Butler C., Orians C. M. Sedum cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof // Ecological Engineering. 2011. Vol. 37. P. 1796-1803. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.025>.
16. Calviño A. A., Tavella J., Beccacece H. M., Estallo E. L., Fabián D., Moreno M. L., Salvo A., Fenoglio M. S. The native - exotic plant choice in green roof design: using a multicriteria decision framework to foster urban biodiversity. 2022. P. 38. <https://doi.org/10.1101/2022.01.07.475351>.

17. Cárdenes V., Ponce De León M., Rodríguez X. A., Rubio-Ordoñez A. Roofing Slate Industry in Spain: History, Geology, and Geoheritage // *Geoheritage*. 2019. Vol. 11. P. 19-34. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0263-y>.
18. Cascone S. Green Roof Design: State of the Art on Technology and Materials // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Article 3020. P. 27. <https://doi.org/10.3390/su11113020>.
19. Connan J. Use and trade of bitumen in antiquity and prehistory: molecular archaeology reveals secrets of past civilizations // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*. 1999. Vol. 354. P. 33-50. <https://doi.org/10.1098/rstb.1999.0358>.
20. Czemieli Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review // *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36. P. 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>.
21. De-Ville S., Menon M., Stovin V. Temporal variations in the potential hydrological performance of extensive green roof systems // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 558. P. 564-578. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.055>.
22. Di Miceli G., Iacuzzi N., Licata M., La Bella S., Tuttolomondo T., Aprile S. Growth and development of succulent mixtures for extensive green roofs in a Mediterranean climate // *PLoS ONE*. 2022. Vol. 17. Article e0269446. P. 19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269446>.
23. Drange T., Aanensen H.-O., Brænne J. Gamle trehus: historikk, reparasjon, vedlikehold. Oslo: Universitetsforlaget, 1992. P. 455.
24. Dunnett N., Nagase A., Hallam A. The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001-2006: influence of substrate depth // *Urban Ecosyst.* 2008. Vol. 11. P. 373-384. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0042-7>.
25. Dunnett N., Nolan A. The Effect of Substrate Depth and Supplementary Watering on the Growth of Nine Herbaceous Perennials in a Semi-Extensive Green Roof // *Acta Horticulturae*. 2004. Vol. 643. P. 305-309. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.643.40>.
26. Dvorak B. Comparative Analysis of Green Roof Guidelines and Standards in Europe and North America // *Journal of Green Building*. 2011. P. 170-191.
27. Elkadi H., Seifhashemi M., Lauwerijssen R. Thermographic Analysis of Green Wall and Green Roof Plant Types under Levels of Water Stress //

Sustainability. 2024. Vol. 16. Article 8685. P. 20.
<https://doi.org/10.3390/su16198685>.

28. Elpiniki C., Tzortzi G., Nerantzia J., Declan R. Roof gardens: an opportunity to expand the art of landscape architecture // Energy, Environment, Ecosystems, Development and Landscape Architecture: Proceedings of the 5th International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD '09). 2009. P. 317-321.

29. Eriksson M., Ka J.-O., Mohn W. W. Effects of Low Temperature and Freeze-Thaw Cycles on Hydrocarbon Biodegradation in Arctic Tundra Soil // Appl Environ Microbiol. 2001. Vol. 67. P. 5107-5112.
<https://doi.org/10.1128/AEM.67.11.5107-5112.2001>.

30. Farrell C., Szota C., Williams N. S. G., Arndt S. K. High water users can be drought tolerant: using physiological traits for green roof plant selection // Plant Soil. 2013. Vol. 372. P. 177-193. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1725-x>.

31. Fassman E., Simcock R. Moisture Measurements as Performance Criteria for Extensive Living Roof Substrates // J. Environ. Eng. 2012. Vol. 138. P. 841-851. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000532](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000532).

32. Filazzola A., Lortie C. J. A systematic review and conceptual framework for the mechanistic pathways of nurse plants // Global Ecology and Biogeography. 2014. Vol. 23. P. 1335-1345. <https://doi.org/10.1111/geb.12202>.

33. F Filonenko O., Avramenko Y., Kidenko V. «Green roofs» - historical experience and modern requirements // znp. 2020. Vol. 2. P. 109-114. <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2352>.

34. Fishburn D. C. Practical Considerations on Design and Installation of Green Roofs: The Waterproofing Challenge. 2006. P. 87-100.

35. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. Green Roof Guidelines. Bonn: FLL, 2018. P. 158.

36. Frizzi G., Drake J. Hydrologic impacts of mat-based retention and detention layers within extensive vegetated roof assemblies // Blue-Green Systems. 2025. Vol. 7. P. 156-169. <https://doi.org/10.2166/bgs.2025.004>.

37. Getter K. L., Rowe D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development // HortSci. 2006. Vol. 41. P. 1276-1285. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1276>.

38. Getter K. L., Rowe D. B. Selecting plants for extensive green roofs in the United States. East Lansing, MI: Michigan State University Extension, 2008. P. 9.

39. Giagnacovo G., Biagiotti D., Di Bonito R., Di Lonardo S., Campiotti C. A. On the influence of plant morphology in the extensive green roof cover: A case study in Mediterranean area // *Ecological Engineering*. 2025. Vol. 213. Article 107562. P. 11. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107562>.
40. Gullbrekken L., Kvande T., Jelle B., Time B. Norwegian Pitched Roof Defects // *Buildings*. 2016. Vol. 6. Article 24. P. 13. <https://doi.org/10.3390/buildings6020024>.
41. Hakimdavar R., Culligan P. J., Finazzi M., Barontini S., Ranzi R. Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance // *Ecological Engineering*. 2014. Vol. 73. P. 494-508. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080>.
42. Hamid H. N. A., Romali N. S., Rahman R. A. Key Barriers and Feasibility of Implementing Green Roofs on Buildings in Malaysia // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Article 2233. P. 16. <https://doi.org/10.3390/buildings13092233>.
43. Heaviside C., Macintyre H., Vardoulakis S. The urban heat island: implications for health in a changing environment // *Current Environmental Health Reports*. 2017. Vol. 4, № 3. P. 296-305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>.
44. Huang B., Zhang Z., Chen W. Framework restoration on Tang Dynasty garden as a multiple-histories environment: Regions, ecology, architecture, and human behavior // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Article e35190. P. 19. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35190>.
45. Irga P. J., Torpy F. R., Griffin D., Wilkinson S. J. Vertical Greening Systems: A Perspective on Existing Technologies and New Design Recommendation // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Article 6014. P. 13. <https://doi.org/10.3390/su15076014>.
46. Jim C. Y. An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. Vol. 27. P. 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.014>.
47. Jim C. Y. Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants // *Sustainable Cities and Society*. 2017. Vol. 35. P. 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.001>.
48. Kader S., Chadalavada S., Jaufer L., Spalevic V., Dudic B. Green roof substrates—A literature review // *Front. Built Environ*. 2022. Vol. 8. Article 1019362. P. 15. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1019362>.

49. Kasimov N., Chalov S., Chubarova N., Kosheleva N., Popovicheva O., Shartova N., Minkina T. Urban heat and pollution island in the Moscow megacity: Urban environmental compartments and their interactions // *Urban Climate*. 2024. Vol. 55. Article 101972. P. 18. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101972>.
50. Kelly L. *Green Roof Construction and Maintenance*. New York: McGraw-Hill, 2006. P. 208.
51. Kemp S., Hadley P., Blanuša T. The influence of plant type on green roof rainfall retention // *Urban Ecosyst*. 2019. Vol. 22. P. 355-366. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0822-2>.
52. Kim H. H. Urban heat island // *International Journal of Remote Sensing*. 1992. T. 13. № 12. P. 2319-2336. <https://doi.org/10.1080/01431169208904271>.
53. Kiran M. U., Naik M. R., Sumathi T., Kumar N. V. Urban greening with vertical gardens: Types, benefits, well-being and environmental sustainability // *Int. J. Res. Agron*. 2025. Vol. 8. P. 304-308. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i7Se.3388>.
54. Köhler M. Long-term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin // *Urban Habitats*. 2006. Vol. 4. P. 3-26.
55. Lamnatou Chr., Chemisana D. A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 43. P. 264-280. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.048>.
56. Li H., Xiang Y., Yang W., Lin T., Xiao Q., Zhang G. Green roof development knowledge map: A review of visual analysis using CiteSpace and VOSviewer // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Article e24958. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24958>.
57. Liao W. *Benefits of Biochar to Green Roofs: Plants, Water, and the Importance of Granulation*. Toronto: University of Toronto, 2024. P. 212.
58. Lundholm J., MacIvor J. S., MacDougall Z., Ranalli M. Plant Species and Functional Group Combinations Affect Green Roof Ecosystem Functions // *PLoS ONE*. 2010. Vol. 5. Article e9677. P. 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009677>.
59. MacIvor J. S., Lundholm J. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate // *Ecological Engineering*. 2011. Vol. 37. P. 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004>.

60. Magill J., Midden K., Groninger J., Therrell M. A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research. 2011. P. 111.
61. Manouchehri M., Santiago López J., Valiente López M. Sustainable Design of Vertical Greenery Systems: A Comprehensive Framework // Sustainability. 2024. Vol. 16. Article 3249. P. 26. <https://doi.org/10.3390/su16083249>.
62. Manso M., Castro-Gomes J. Green wall systems: A review of their characteristics // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 41. P. 863-871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>.
63. Mentens J., Raes D., Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? // Landscape and Urban Planning. 2006. Vol. 77. P. 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>.
64. Nagase A., Dunnett N. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs // Landscape and Urban Planning. 2011. Vol. 103. P. 230-236. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.012>.
65. Nevermann S., Hoffmann H., Theodorou P., Peters I., Husemann M. Metabarcoding assessment of arthropod diversity on green roofs in the metropolitan city of Hamburg // Journal of Urban Ecology. 2025. Vol. 11. Article juaf003. P. 10. <https://doi.org/10.1093/jue/juaf003>.
66. Ngan G. Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design. 2004. P. 52.
67. Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R. R., Doshi H., Dunnett N., Gaffin S., Köhler M., Liu K. K. Y., Rowe B. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services // BioScience. 2007. Vol. 57. P. 823-833. <https://doi.org/10.1641/B571005>.
68. Osawa T. M., Pereira M. C. S., Leite B. C. C., Martins J. R. S. Impact of an Aged Green Roof on Stormwater Quality and First-Flush Dynamics // Buildings. 2025. Vol. 15. Article 1763. P. 17. <https://doi.org/10.3390/buildings15111763>.
69. Peng Z., Edmondson J., Stirling R., Green D., Dawson R., De-Ville S., Stovin V. Visualisation of clogging in green infrastructure growing media // Urban Water Journal. 2023. Vol. 20. P. 477-486. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2180394>.

70. Pérez-Urrestarazu L., Fernández-Cañero R., Franco-Salas A., Egea G. Vertical Greening Systems and Sustainable Cities // *Journal of Urban Technology*. 2015. Vol. 22. P. 65-85. <https://doi.org/10.1080/10630732.2015.1073900>.
71. Philippi P. M. Introduction to the German FLL-guideline for the planning, execution and upkeep of green roof sites. 2025. P. 18.
72. Popov A. V., Melnikova I. B., Slepchenko A. N. The main historical development stages of accessible green roofs in the urban environment // *Amazonia Investiga*. 2019. Vol. 8. P. 406-418.
73. Richter M., Dickhaut W. Long-Term Performance of Blue-Green Roof Systems—Results of a Building-Scale Monitoring Study in Hamburg, Germany // *Water*. 2023. Vol. 15. Article 2806. P. 19. <https://doi.org/10.3390/w15152806>.
74. Rizwan A. M., Dennis L. Y. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island // *Journal of Environmental Sciences*. 2008. Vol. 20, № 1. P. 120-128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4).
75. Rizzo G., Cirrincione L., La Gennusa M., Peri G., Scaccianoce G. Green Roofs' End of Life: A Literature Review // *Energies*. 2023. Vol. 16. Article 596. P. 16. <https://doi.org/10.3390/en16020596>.
76. Rodríguez J., Vilela K. Influence of the Types of Grass of Green Roofs for the Design of Thermal Comfort in Buildings // *J. Ecol. Eng.* 2022. Vol. 23. P. 223-229. <https://doi.org/10.12911/22998993/146191>.
77. Schindler B. Y., Blank L., Levy S., Kadas G., Pearlmutter D., Blaustein L. Integration of photovoltaic panels and green roofs: review and predictions of effects on electricity production and plant communities // *Israel J Ecol Evol*. 2016. Vol. 62. P. 68-73. <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1048617>.
78. Scholz-Barth K., Tanner S. Green Roofs: Federal Energy Management Program (FEMP) Federal Technology Alert. Report No. DOE/EE-0298. 2004. P. 24. <https://doi.org/10.2172/15009602>.
79. Shafique M., Kim R.-H., Lee D. The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. 2016. Vol. 15. P. 715-718.
80. Shahmohammad M., Hosseinzadeh M., Dvorak B., Bordbar F., Shahmohammadmirab H., Aghamohammadi N. Sustainable green roofs: a comprehensive review of influential factors // *Environ Sci Pollut Res*. 2022. V. 29. P. 78228-78254. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23405-x>.

81. Shao H., Kim G. A Comprehensive Review of Different Types of Green Infrastructure to Mitigate Urban Heat Islands: Progress, Functions, and Benefits // *Land*. 2022. Vol. 11. Article 1792. P. 28. <https://doi.org/10.3390/land11101792>.
82. Simmons M. T., Gardiner B., Windhager S., Tinsley J. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate // *Urban Ecosyst*. 2008. Vol. 11. P. 339-348. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>.
83. Stater D. Green Roofs: Sustainability from the Top Down. University of California, 2019. P. 50.
84. Szlachetka O., Witkowska-Dobrev J., Baryła A., Dohojda M. Experimental Evaluation of the Sustainable Performance of Filtering Geotextiles in Green Roof Systems: Tensile Properties and Surface Morphology After Long-Term Use // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. Article 6242. P. 16. <https://doi.org/10.3390/su17146242>.
85. Teng T. V., Kasim N., Zainal R., Musa S. M. S., Noh H. M. Study of green roof system implementation in green building construction. 2021. Vol. 2. P. 734-750.
86. Todeschini C. C., Fett-Neto A. G. Life at the Top: Extensive Green Roof Plant Species and Their Traits for Urban Use // *Plants*. 2025. Vol. 14. Article 735. P. 24. <https://doi.org/10.3390/plants14050735>.
87. Van Hoof J., Van Dijken F. The historical turf farms of Iceland: Architecture, building technology and the indoor environment // *Building and Environment*. 2008. Vol. 43. P. 1023-1030. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.004>.
88. Vitaliano S., Cascone S., D'Urso P. R. Mitigating Built Environment Air Pollution by Green Systems: An In-Depth Review // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Article 6487. P. 19. <https://doi.org/10.3390/app14156487>.
89. Wang X., Gard W., Borska H., Ursem B., Van De Kuilen J. W. G. Vertical greenery systems: from plants to trees with self-growing interconnections // *Eur. J. Wood Prod*. 2020. Vol. 78. P. 1031-1043. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01583-0>.
90. Wonders S. Engineering the Hanging Garden of Babylon. 2016. P. 22-25.

91. Xie C., Liu D., Jim C. Y. Vicissitudes and prospects of green roof research: a two-decade systematic bibliometric review // *Front. Ecol. Evol.* 2024. Vol. 11. Article 1331930. P. 17. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1331930>.
92. Zhang Y. Characteristics of Green Roof and Vertical Greening Systems and Its Application Prospect in Hong Kong. 2023. P. 75.
93. ZinCo USA. System Solutions for Sloped Green Roofs. 2019. P. 12.

References

1. Bezuglova O. S., Gorbov S. N., Morozov I. V., Nevidomskaya D. G. Urban Soil Science. 2012. P. 264. (in Rus)
2. Bezuglova O. S., Gorbov S. N., Skripnikov P. N. Humus Status of the Soils of the Rostov Agglomeration. 2022. P. 138. (in Rus)
3. Ginzburg A. S., Dokukin S. A. Impact of Atmospheric Thermal Pollution on Urban Climate (Assessment Using the COSMO-CLM Model). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2021. Vol. 57. No. 1. P. 53-66. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010053> (in Rus)
4. Gorbov S. N., Bezuglova O. S. Soil Cover of the Rostov Agglomeration. 2022. P. 186. (in Rus)
5. GOST R 58875-2020. Green Standards. Greened and Operated Roofs of Buildings and Structures. Technical and Environmental Requirements. 2020. P. 54. (in Rus)
6. Dyachkova O. N. Organizational and Technological Reliability of Urban Green Spaces. *Industrial and Civil Engineering.* 2022. P. 61-67. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.07.61-67> (in Rus)
7. Zhdanova I. V., Kuznetsova A. A., Dorofeeva E. D. Environmental and Aesthetic Aspects of the Application of Vertical Greening and Green Roofs in Residential Buildings. 2019. P. 53-59. (in Rus)
8. Konstantinov P. I., Varentsov M. I., Baklanov A. A. Urban Climate Research in the Russian Federation at the Beginning of the 21st Century. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2025. Vol. 61. No. 6. P. 833-852. <https://doi.org/10.7868/S3034648725060098> (in Rus)
9. Lokoshchenko M. A., Erukova E. A. Urban Heat Islands of Small Towns and Villages in the Moscow Region. *Doklady Earth Sciences.* 2021. Vol. 500. No. 2. P. 200-207. <https://doi.org/10.31857/S268673972110011X> (in Rus)
10. Myagkov M. S. Environmental Consequences of Mesoclimatic Anomalies in the Moscow Megacity. *Ecology of Urbanized Territories.* 2006. No. 4. P. 28-34. (in Rus)

11. Titova N. P. Roof Gardens. Moscow: Olma-Press Grand, 2003. P. 112. (in Rus)
12. Abass F., Ismail L. H., Wahab I. A., Elgadi A. A. A Review of Green Roof: Definition, History, Evolution and Functions. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 713. Article 012048. P. 9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/713/1/012048>
13. Adesoji T., Pearce A. Interdisciplinary Perspectives on Green Infrastructure: A Systematic Exploration of Definitions and Their Origins. Environments 2024. Vol. 11. Article 8 P. 32. <https://doi.org/10.3390/environments11010008>.
14. Bellini A., Bartoli F., Caneva G. Extensive Green Roofs (EGRs) and the Five Ws: A Quantitative Analysis on the Origin and Evolution, Aims, Approaches, and Botanical Views // Sustainability. 2024. Vol. 16. Article 1033 P. 16. <https://doi.org/10.3390/su16031033>.
15. Butler C., Orians C. M. Sedum cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof // Ecological Engineering. 2011. Vol. 37. P. 1796-1803. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.06.025>.
16. Calviño A. A., Tavella J., Beccacece H. M., Estallo E. L., Fabián D., Moreno M. L., Salvo A., Fenoglio M. S. The native - exotic plant choice in green roof design: using a multicriteria decision framework to foster urban biodiversity. 2022. P. 38. <https://doi.org/10.1101/2022.01.07.475351>.
17. Cárdenes V., Ponce De León M., Rodríguez X. A., Rubio-Ordoñez A. Roofing Slate Industry in Spain: History, Geology, and Geoheritage // Geoheritage. 2019. Vol. 11. P. 19-34. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0263-y>.
18. Cascone S. Green Roof Design: State of the Art on Technology and Materials // Sustainability. 2019. Vol. 11. Article 3020. P. 27. <https://doi.org/10.3390/su11113020>.
19. Connan J. Use and trade of bitumen in antiquity and prehistory: molecular archaeology reveals secrets of past civilizations // Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. 1999. Vol. 354. P. 33-50. <https://doi.org/10.1098/rstb.1999.0358>.
20. Czemieli Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review // Ecological Engineering. 2010. Vol. 36. P. 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>.

21. De-Ville S., Menon M., Stovin V. Temporal variations in the potential hydrological performance of extensive green roof systems // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 558. P. 564-578. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.055>.
22. Di Miceli G., Iacuzzi N., Licata M., La Bella S., Tuttolomondo T., Aprile S. Growth and development of succulent mixtures for extensive green roofs in a Mediterranean climate // *PLoS ONE*. 2022. Vol. 17. Article e0269446. P. 19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269446>.
23. Drange T., Aanensen H.-O., Brænne J. Gamle trehus: historikk, reparasjon, vedlikehold. Oslo: Universitetsforlaget, 1992. P. 455.
24. Dunnett N., Nagase A., Hallam A. The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001-2006: influence of substrate depth // *Urban Ecosyst*. 2008. Vol. 11. P. 373-384. <https://doi.org/10.1007/s11252-007-0042-7>.
25. Dunnett N., Nolan A. The Effect of Substrate Depth and Supplementary Watering on the Growth of Nine Herbaceous Perennials in a Semi-Extensive Green Roof // *Acta Horticulturae*. 2004. Vol. 643. P. 305-309. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.643.40>.
26. Dvorak B. Comparative Analysis of Green Roof Guidelines and Standards in Europe and North America // *Journal of Green Building*. 2011. P. 170-191.
27. Elkadi H., Seifhashemi M., Lauwerijssen R. Thermographic Analysis of Green Wall and Green Roof Plant Types under Levels of Water Stress // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Article 8685. P. 20. <https://doi.org/10.3390/su16198685>.
28. Elpiniki C., Tzortzi G., Nerantzia J., Declan R. Roof gardens: an opportunity to expand the art of landscape architecture // *Energy, Environment, Ecosystems, Development and Landscape Architecture: Proceedings of the 5th International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development (EEESD '09)*. 2009. P. 317-321.
29. Eriksson M., Ka J.-O., Mohn W. W. Effects of Low Temperature and Freeze-Thaw Cycles on Hydrocarbon Biodegradation in Arctic Tundra Soil // *Appl Environ Microbiol*. 2001. Vol. 67. P. 5107-5112. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.11.5107-5112.2001>.

30. Farrell C., Szota C., Williams N. S. G., Arndt S. K. High water users can be drought tolerant: using physiological traits for green roof plant selection // *Plant Soil*. 2013. Vol. 372. P. 177-193. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1725-x>.
31. Fassman E., Simcock R. Moisture Measurements as Performance Criteria for Extensive Living Roof Substrates // *J. Environ. Eng.* 2012. Vol. 138. P. 841-851. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000532](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000532).
32. Filazzola A., Lortie C. J. A systematic review and conceptual framework for the mechanistic pathways of nurse plants // *Global Ecology and Biogeography*. 2014. Vol. 23. P. 1335-1345. <https://doi.org/10.1111/geb.12202>.
33. Filonenko O., Avramenko Y., Kidenko V. «Green roofs» - historical experience and modern requirements // *znp*. 2020. Vol. 2. P. 109-114. <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2352>.
34. Fishburn D. C. Practical Considerations on Design and Installation of Green Roofs: The Waterproofing Challenge. 2006. P. 87-100.
35. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. Green Roof Guidelines. Bonn: FLL, 2018. P. 158.
36. Frizzi G., Drake J. Hydrologic impacts of mat-based retention and detention layers within extensive vegetated roof assemblies // *Blue-Green Systems*. 2025. Vol. 7. P. 156-169. <https://doi.org/10.2166/bgs.2025.004>.
37. Getter K. L., Rowe D. B. The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development // *HortSci*. 2006. Vol. 41. P. 1276-1285. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1276>.
38. Getter K. L., Rowe D. B. Selecting plants for extensive green roofs in the United States. East Lansing, MI: Michigan State University Extension, 2008. P. 9.
39. Giagnacovo G., Biagiotti D., Di Bonito R., Di Lonardo S., Campiotti C. A. On the influence of plant morphology in the extensive green roof cover: A case study in Mediterranean area // *Ecological Engineering*. 2025. Vol. 213. Article 107562. P. 11. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107562>.
40. Gullbrekken L., Kvande T., Jelle B., Time B. Norwegian Pitched Roof Defects // *Buildings*. 2016. Vol. 6. Article 24. P. 13. <https://doi.org/10.3390/buildings6020024>.
41. Hakimdavar R., Culligan P. J., Finazzi M., Barontini S., Ranzi R. Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic

performance // *Ecological Engineering*. 2014. Vol. 73. P. 494-508. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.080>.

42. Hamid H. N. A., Romali N. S., Rahman R. A. Key Barriers and Feasibility of Implementing Green Roofs on Buildings in Malaysia // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Article 2233. P. 16. <https://doi.org/10.3390/buildings13092233>.

43. Heaviside C., Macintyre H., Vardoulakis S. The urban heat island: implications for health in a changing environment // *Current Environmental Health Reports*. 2017. Vol. 4, № 3. P. 296-305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>.

44. Huang B., Zhang Z., Chen W. Framework restoration on Tang Dynasty garden as a multiple-histories environment: Regions, ecology, architecture, and human behavior // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Article e35190. P. 19. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35190>.

45. Irga P. J., Torpy F. R., Griffin D., Wilkinson S. J. Vertical Greening Systems: A Perspective on Existing Technologies and New Design Recommendation // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Article 6014. P. 13. <https://doi.org/10.3390/su15076014>.

46. Jim C. Y. An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. Vol. 27. P. 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.014>.

47. Jim C. Y. Green roof evolution through exemplars: Germinal prototypes to modern variants // *Sustainable Cities and Society*. 2017. Vol. 35. P. 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.001>.

48. Kader S., Chadalavada S., Jaufer L., Spalevic V., Dudic B. Green roof substrates—A literature review // *Front. Built Environ*. 2022. Vol. 8. Article 1019362. P. 15. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1019362>.

49. Kasimov N., Chalov S., Chubarova N., Kosheleva N., Popovicheva O., Shartova N., Minkina T. Urban heat and pollution island in the Moscow megacity: Urban environmental compartments and their interactions // *Urban Climate*. 2024. Vol. 55. Article 101972. P. 18. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101972>.

50. Kelly L. *Green Roof Construction and Maintenance*. New York: McGraw-Hill, 2006. P. 208.

51. Kemp S., Hadley P., Blanuša T. The influence of plant type on green roof rainfall retention // *Urban Ecosyst*. 2019. Vol. 22. P. 355-366. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0822-2>.

52. Kim H. H. Urban heat island // International Journal of Remote Sensing. 1992. T. 13. № 12. P. 2319-2336. <https://doi.org/10.1080/01431169208904271>.
53. Kiran M. U., Naik M. R., Sumathi T., Kumar N. V. Urban greening with vertical gardens: Types, benefits, well-being and environmental sustainability // Int. J. Res. Agron. 2025. Vol. 8. P. 304-308. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i7Se.3388>.
54. Köhler M. Long-term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin // Urban Habitats. 2006. Vol. 4. P. 3-26.
55. Lamnatou Chr., Chemisana D. A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 43. P. 264-280. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.048>.
56. Li H., Xiang Y., Yang W., Lin T., Xiao Q., Zhang G. Green roof development knowledge map: A review of visual analysis using CiteSpace and VOSviewer // Heliyon. 2024. Vol. 10. Article e24958. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24958>.
57. Liao W. Benefits of Biochar to Green Roofs: Plants, Water, and the Importance of Granulation. Toronto: University of Toronto, 2024. P. 212.
58. Lundholm J., MacIvor J. S., MacDougall Z., Ranalli M. Plant Species and Functional Group Combinations Affect Green Roof Ecosystem Functions // PLoS ONE. 2010. Vol. 5. Article e9677. P. 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009677>.
59. MacIvor J. S., Lundholm J. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate // Ecological Engineering. 2011. Vol. 37. P. 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004>.
60. Magill J., Midden K., Groninger J., Therrell M. A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research. 2011. P. 111.
61. Manouchehri M., Santiago López J., Valiente López M. Sustainable Design of Vertical Greenery Systems: A Comprehensive Framework // Sustainability. 2024. Vol. 16. Article 3249. P. 26. <https://doi.org/10.3390/su16083249>.
62. Manso M., Castro-Gomes J. Green wall systems: A review of their characteristics // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 41. P. 863-871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>.

63. Mentens J., Raes D., Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? // *Landscape and Urban Planning*. 2006. Vol. 77. P. 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>.
64. Nagase A., Dunnett N. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs // *Landscape and Urban Planning*. 2011. Vol. 103. P. 230-236. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.012>.
65. Nevermann S., Hoffmann H., Theodorou P., Peters I., Husemann M. Metabarcoding assessment of arthropod diversity on green roofs in the metropolitan city of Hamburg // *Journal of Urban Ecology*. 2025. Vol. 11. Article juaf003. P. 10. <https://doi.org/10.1093/jue/juaf003>.
66. Ngan G. Green Roof Policies: Tools for Encouraging Sustainable Design. 2004. P. 52.
67. Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R. R., Doshi H., Dunnett N., Gaffin S., Köhler M., Liu K. K. Y., Rowe B. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services // *BioScience*. 2007. Vol. 57. P. 823-833. <https://doi.org/10.1641/B571005>.
68. Osawa T. M., Pereira M. C. S., Leite B. C. C., Martins J. R. S. Impact of an Aged Green Roof on Stormwater Quality and First-Flush Dynamics // *Buildings*. 2025. Vol. 15. Article 1763. P. 17. <https://doi.org/10.3390/buildings15111763>.
69. Peng Z., Edmondson J., Stirling R., Green D., Dawson R., De-Ville S., Stovin V. Visualisation of clogging in green infrastructure growing media // *Urban Water Journal*. 2023. Vol. 20. P. 477-486. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2180394>.
70. Pérez-Urrestarazu L., Fernández-Cañero R., Franco-Salas A., Egea G. Vertical Greening Systems and Sustainable Cities // *Journal of Urban Technology*. 2015. Vol. 22. P. 65-85. <https://doi.org/10.1080/10630732.2015.1073900>.
71. Philippi P. M. Introduction to the German FLL-guideline for the planning, execution and upkeep of green roof sites. 2025. P. 18.
72. Popov A. V., Melnikova I. B., Slepchenko A. N. The main historical development stages of accessible green roofs in the urban environment // *Amazonia Investiga*. 2019. Vol. 8. P. 406-418.

73. Richter M., Dickhaut W. Long-Term Performance of Blue-Green Roof Systems—Results of a Building-Scale Monitoring Study in Hamburg, Germany // *Water*. 2023. Vol. 15. Article 2806. P. 19. <https://doi.org/10.3390/w15152806>.
74. Rizwan A. M., Dennis L. Y. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island // *Journal of Environmental Sciences*. 2008. Vol. 20, № 1. P. 120-128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4).
75. Rizzo G., Cirrincione L., La Gennusa M., Peri G., Scaccianoce G. Green Roofs' End of Life: A Literature Review // *Energies*. 2023. Vol. 16. Article 596. P. 16. <https://doi.org/10.3390/en16020596>.
76. Rodríguez J., Vilela K. Influence of the Types of Grass of Green Roofs for the Design of Thermal Comfort in Buildings // *J. Ecol. Eng.* 2022. Vol. 23. P. 223-229. <https://doi.org/10.12911/22998993/146191>.
77. Schindler B. Y., Blank L., Levy S., Kadas G., Pearlmutter D., Blaustein L. Integration of photovoltaic panels and green roofs: review and predictions of effects on electricity production and plant communities // *Israel J Ecol Evol*. 2016. Vol. 62. P. 68-73. <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1048617>.
78. Scholz-Barth K., Tanner S. Green Roofs: Federal Energy Management Program (FEMP) Federal Technology Alert. Report No. DOE/EE-0298. 2004. P. 24. <https://doi.org/10.2172/15009602>.
79. Shafique M., Kim R.-H., Lee D. The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. 2016. Vol. 15. P. 715-718.
80. Shahmohammad M., Hosseinzadeh M., Dvorak B., Bordbar F., Shahmohammadmirab H., Aghamohammadi N. Sustainable green roofs: a comprehensive review of influential factors // *Environ Sci Pollut Res*. 2022. V. 29. P. 78228-78254. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23405-x>.
81. Shao H., Kim G. A Comprehensive Review of Different Types of Green Infrastructure to Mitigate Urban Heat Islands: Progress, Functions, and Benefits // *Land*. 2022. Vol. 11. Article 1792. P. 28. <https://doi.org/10.3390/land11101792>.
82. Simmons M. T., Gardiner B., Windhager S., Tinsley J. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate // *Urban Ecosyst*. 2008. Vol. 11. P. 339-348. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>.
83. Stater D. Green Roofs: Sustainability from the Top Down. University of California, 2019. P. 50.

84. Szlachetka O., Witkowska-Dobrev J., Baryła A., Dohojda M. Experimental Evaluation of the Sustainable Performance of Filtering Geotextiles in Green Roof Systems: Tensile Properties and Surface Morphology After Long-Term Use // Sustainability. 2025. Vol. 17. Article 6242. P. 16. <https://doi.org/10.3390/su17146242>.
85. Teng T. V., Kasim N., Zainal R., Musa S. M. S., Noh H. M. Study of green roof system implementation in green building construction. 2021. Vol. 2. P. 734-750.
86. Todeschini C. C., Fett-Neto A. G. Life at the Top: Extensive Green Roof Plant Species and Their Traits for Urban Use // Plants. 2025. Vol. 14. Article 735. P. 24. <https://doi.org/10.3390/plants14050735>.
87. Van Hoof J., Van Dijken F. The historical turf farms of Iceland: Architecture, building technology and the indoor environment // Building and Environment. 2008. Vol. 43. P. 1023-1030. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.004>.
88. Vitaliano S., Cascone S., D'Urso P. R. Mitigating Built Environment Air Pollution by Green Systems: An In-Depth Review // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Article 6487. P. 19. <https://doi.org/10.3390/app14156487>.
89. Wang X., Gard W., Borska H., Ursem B., Van De Kuilen J. W. G. Vertical greenery systems: from plants to trees with self-growing interconnections // Eur. J. Wood Prod. 2020. Vol. 78. P. 1031-1043. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01583-0>.
90. Wonders S. Engineering the Hanging Garden of Babylon. 2016. P. 22-25.
91. Xie C., Liu D., Jim C. Y. Vicissitudes and prospects of green roof research: a two-decade systematic bibliometric review // Front. Ecol. Evol. 2024. Vol. 11. Article 1331930. P. 17. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1331930>.
92. Zhang Y. Characteristics of Green Roof and Vertical Greening Systems and Its Application Prospect in Hong Kong. 2023. P. 75.
93. ZinCo USA. System Solutions for Sloped Green Roofs. 2019. P. 12.

GREEN ROOF TECHNOLOGIES IN THE MODERN URBAN ENVIRONMENT (REVIEW)

Gubaeva I. Sh.^{1*}, Gorbov S. N.^{1,2}, Salnik N. V.^{1,2}, Tsymerskaya K. A.^{1,2}, Pinyaev A.V.¹

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

²Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory, Russia

Giman95@yandex.ru*, gorbow@mail.ru, n.salnik.w@yandex.ru, krichtinaskip@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3758-659X, 0000-0002-0174-1631, 0000-0001-7840-365X,
0009-0001-9534-6199

Abstract

Green roof technology has become an important component of nature-based solutions aimed at enhancing the environmental sustainability and climate resilience of urban areas. *This review* synthesizes current advances in green roof technology, with particular emphasis on classification, historical development, structural design, substrate composition, vegetation selection, and regional adaptation strategies.

The review draws upon an analysis of *Russian and* international scientific literature, regulatory documents (GOST R 58875-2020 and the FLL Guidelines), and studies published between 1992 and 2025. *The review* examines the main types of green roofs, their structural components, substrate design principles, and current approaches to vegetation selection. *Particular attention* is given to the engineering and ecosystem functions of green roofs, including stormwater retention, mitigation of building heat loads, reduction of the urban heat island effect, and enhancement of urban biodiversity.

The review also considers emerging hybrid technologies integrating green roofs with rainwater harvesting and photovoltaic systems, as well as approaches to adapting green roof design and plant communities to the climatic conditions of the Russian Federation. *The analysis* demonstrates that the performance of green roofs depends on the interaction between engineering design, substrate properties, and well-adapted vegetation. *Future advances* in green roof technology will require region-specific design strategies that account for local environmental and climatic conditions.

Keywords

Constructed soils; green roof vegetation; green infrastructure; stormwater management; sustainable urban development.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2026 г.

Поступила после доработки 24 июня 2026 г.

Принята к печати 28 июня 2026 г.

Received 10, June, 2026

Revised 24, June, 2026

Accepted 28, June, 2026