1.5.9. Ботаника

Научная статья

УДК 581.526:69.059

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОТБОР УСТОЙЧИВЫХ МНОГОВИДОВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ДЛЯ ЭКСТЕНСИВНЫХ ЗЕЛЁНЫХ КРЫШ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННОГО КЛИМАТА

Марьев Владимир Александрович, кандидат технических наук, заместитель начальника управления перспективных технологий и стандартизации, Российский дорожный научно-исследовательский институт, Россия, Москва, rosdornii.vladimir@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматривается устойчивость растительных сообществ экстенсивных зелёных крыш в условиях умеренно-континентального климата. Цель исследования заключается в сопоставлении сохранности и динамики растительного покрова при различном видовом составе, глубине субстрата и режиме увлажнения. Экспериментальная схема включает четыре типа растительных сообществ, два уровня глубины субстрата — 8 и 15 см — и два режима водообеспечения. Сопоставлены показатели приживаемости, перезимовки, проективного покрытия и спонтанного заселения растений. Установлено, что глубина субстрата и видовой состав сопровождаются различиями в сохранности растительности. При этом оценка преимуществ многовидовых сообществ требует учёта неодинаковой начальной плотности посадки, а тринадцативидовой вариант должен рассматриваться отдельно от четырёх- и пятикомпонентных смесей. Сделан вывод о необходимости дифференцированного подбора растительных сообществ с учётом их биологических характеристик и параметров кровельной конструкции.

Ключевые слова: экстенсивные зелёные крыши; растительные сообщества; видовой состав; перезимовка; глубина субстрата; устойчивость растительного покрова.

Original article

EXPERIMENTAL SELECTION OF RESILIENT MULTI-SPECIES PLANT COMMUNITIES FOR EXTENSIVE GREEN ROOFS IN TEMPERATE CLIMATES

Marev Vladimir Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Department of Advanced Technologies and Standardization, Russian Road Research Institute, Moscow, Russia, rosdornii.vladimir@inbox.ru

Abstract. This article examines the sustainability of extensive green roof plant communities in a temperate continental climate. The aim of the study is to compare the persistence and growth of vegetation under different species compositions, substrate depths, and moisture regimes. The experimental design includes four types of plant communities, two substrate depths—8 and 15 cm—and two water supply regimes. Indicators of establishment, overwintering, projective cover, and spontaneous colonization of plants are compared. It has been established that substrate depth and species composition are associated with differences in vegetation persistence. Evaluating the benefits of multi-species communities requires taking into account varying initial planting densities, and the thirteen-species variant should be considered separately from four- and five-component mixtures. A conclusion is drawn regarding the need for a differentiated selection of plant communities, taking into account their biological characteristics and roof structure parameters.

Keywords: extensive green roofs; plant communities; species composition; overwintering; substrate depth; vegetation stability.

Введение. В условиях урбанизации возникает необходимость интеграции растительности в архитектурную среду, в том числе посредством создания озеленённых кровель. С ботанической и экологической точек зрения, экстенсивные зелёные крыши представляют собой специфические технические фитоценозы, сформированные в условиях жёсткого лимитирующего фактора —

ограниченного объёма субстратного слоя [1-3]. Изоляция от материнской породы и глубинных горизонтов почвы создаёт для растений экстремальные микроклиматические условия. Сильный ветер, дефицит доступной влаги и резкие суточные колебания температуры создают комплекс стрессовых факторов, к которым растения должны быть морфофизиологически адаптированы [4].

Фундаментальную роль в функционировании таких антропогенных экосистем играют физико-химические свойства субстрата [5]. Замена традиционных почвенных профилей облегчёнными искусственными субстратами на основе вулканических пород или торфяных смесей существенно изменяет гидрологический и биохимический режимы. Именно глубина закладки субстрата и его гранулометрический состав определяют ёмкость удержания влаги и доступность элементов минерального питания [6]. При этом растительность выступает активным регулятором процессов: развиваясь в условиях дефицита ресурсов, виды модифицируют транспирационный потенциал и влияют на качество фильтрующихся вод, что порождает компромиссы между продуктивностью фитомассы и средозащитными функциями [7].

Исторически сложившаяся практика проектирования кровельных систем опиралась на использование монокультур суккулентов рода Sedum, обладающих высокой ксерофитностью. Однако современный этап развития урбоэкологии демонстрирует несостоятельность подобных упрощённых посадок [8]. Монодоминантные сообщества оказываются уязвимыми перед климатическими аномалиями и не способны в полной мере обеспечивать полифункциональность экосистемы. Включение в состав технических фитоценозов видов из различных жизненных форм, таких как злаки, разнотравье и низкорослые кустарнички, существенно повышает устойчивость системы [9]. Разнообразие видов позволяет полнее использовать доступное пространство и ресурсы, поскольку разные таксоны выполняют различные функции, включая эффективное поглощение

осадков и терморегуляцию субстрата.

Формирование многовидовых сообществ на крышах сопровождается сложными межвидовыми взаимодействиями, характер которых зависит от параметров искусственной среды. Между растениями возникают конкурентные и фасилитационные взаимодействия, поэтому свойства сообщества не сводятся к сумме эффектов отдельных видов [10]. Например, таксоны с мощной корневой системой и высокой потребностью в воде могут формировать большую биомассу, но при этом усиливать вынос нитратов с дренажными водами на глубоких субстратах природного происхождения. В то же время на облегчённых искусственных субстратах возрастает роль механизмов комплементарности, позволяющих сообществу поддерживать стабильный водный баланс даже в периоды затяжной засухи. Выявление таких скрытых закономерностей требует отказа от оценки отдельных физиологических показателей в пользу анализа комплексного отклика фитоценоза.

Несмотря на накопленный эмпирический материал, проблема конструирования устойчивых многовидовых фитоценозов для условий умеренного климата остаётся нерешённой. Специфика региона, выражающаяся в продолжительных зимних периодах, чередующихся с весенним дефицитом влаги и летними пиками инсоляции, накладывает отпечаток на фенологию и выживаемость интродуцируемых видов. Существующие рекомендации часто экстраполируются из данных, полученных в иных климатических зонах или для монокультур, что снижает их прогностическую ценность. В связи с этим, экспериментальный отбор видов, способных формировать стабильные, самоподдерживающиеся ассоциации на технических субстратах малой мощности, приобретает критическое значение для развития инженерной ботаники.

Обзор источников литературы. Практика озеленения кровель в европейских городах насчитывает несколько десятилетий, однако ботаническое обоснование подбора видов для экстенсивных систем до сих пор опирается

преимущественно на эмпирический опыт, а не на результаты контролируемых полевых экспериментов. Традиционный подход сводился к высадке одного-двух видов рода Sedum, чаще всего S. acre и S. album, что диктовалось их очевидной ксерофитностью и способностью вегетировать на тонком слое субстрата. Rowe, Getter и Durhman (2012) проследили сукцессию сообществ семейства Crassulaceae на модельных кровлях в Мичигане на протяжении семи лет и зафиксировали постепенное обеднение первоначально высаженных популяций при глубине субстрата менее 10 см. Авторы связали выпадение части таксонов с повторяющимися зимними стрессами и летними засухами, которые тонкий почвенный профиль не способен буферизовать [11-13].

Ситуация изменилась, когда Lundholm с соавторами (Lundholm et al., 2010; Lundholm, 2015) перенесли на кровельные системы экспериментальную логику исследований биоразнообразия и функционирования экосистем, ранее апробированную на луговых сообществах (Tilman et al.; Fargione et al., 2007). В четырёхлетнем полевом опыте в Галифаксе (Канада) Lundholm (2015) варьировал число высаженных жизненных форм — от одной до пяти — и оценивал отклик нескольких экосистемных свойств одновременно. Квантильная регрессия показала, что верхние перцентили продуктивности, водоудержания и поглощения нитратов достоверно возрастали с увеличением числа жизненных форм [14]. Автор интерпретировал этот результат с позиций комплементарности ниш: разные функциональные группы использовали ресурсы субстрата в разные периоды, что в совокупности повышало мультифункциональность кровельного фитоценоза.

Dusza et al. (2017) развили эту линию, заложив горшечный эксперимент, в котором факторно сочетали двадцать видов из пяти семейств (Asteraceae, Caryophyllaceae, Crassulaceae, Fabaceae, Poaceae), два типа субстрата — природный и искусственный — и две глубины закладки (10 и 30 см). Авторы измеряли надземную и подземную биомассу, транспирацию, содержание азота и углерода в листьях, водоудержание субстрата, а также концентрации

растворённого органического углерода и нитратов в лизиметрических водах. Результаты показали, что влияние видового состава зависело от глубины субстрата: на мелком профиле различия между смесями сглаживались, тогда как при глубине 30 см многовидовые комбинации достоверно превосходили монокультуры по совокупности функций. При этом искусственный субстрат усиливал вымывание нитратов, особенно под злаками, что Dusza et al. связали с более рыхлой структурой матрицы и ускоренной минерализацией.

Оба цитированных исследования проведены в климатических условиях, далёких от умеренно-континентальных: Галифакс характеризуется морским климатом с мягкой зимой, а Париж — субатлантическим режимом с относительно ровным увлажнением. Перенос полученных выводов на территорию с выраженной континентальностью, где амплитуда между январскими и июльскими температурами превышает 30 °C, а снежный покров может сменяться оттепелями и повторными заморозками, требует отдельной проверки. MacIvor и Lundholm (2011) специально оценивали зимостойкость аборигенных видов на кровлях в приморском климате и отметили, что ряд таксонов, успешно вегетировавших в первый сезон, не переживал зиму. Для районов с более суровыми зимами этот фильтр отбора должен действовать ещё жёстче, однако экспериментальных данных, где перезимовка выступала бы целевым показателем, в доступной литературе практически нет [15].

Отдельного внимания заслуживает вопрос о спонтанном заселении кровель. Oberndorfer и Lundholm (2009) описали колонизацию прибрежных barren-сообществ и показали, что видовой пул окрестных местообитаний определяет траекторию сукцессии на нарушенных субстратах. На зелёных крышах аналогичный процесс задокументирован Brenneisen (2006) в Швейцарии: кровли, спроектированные как местообитания для городской фауны, со временем обогащались видами, занесёнными ветром и птицами. В условиях Среднего Поволжья, где матрица городской застройки соседствует с остепнёнными лугами и нарушенными пустырями, потенциал спонтанной

колонизации может оказаться значительным, но его вклад в формирование устойчивого покрова на тонких технических субстратах не изучен [16].

Таким образом, в современной литературе обозначился разрыв: теоретическая база, обосновывающая преимущество многовидовых кровельных сообществ, сформирована, однако экспериментальная верификация для умеренно-континентального климата отсутствует. Неясно, какие именно комбинации видов сохраняют стабильность после нескольких зим, как глубина субстрата взаимодействует с составом смеси в условиях резких сезонных контрастов и насколько функциональные показатели, зарегистрированные в морском и субатлантическом климате, воспроизводятся при континентальном режиме температур и увлажнения.

Методологическая и теоретическая база исследования. Концептуальной основой работы послужила гипотеза мультифункциональности экосистем, сформулированная Maestre et al. (2012) на материале аридных сообществ и впоследствии распространённая на антропогенные фитоценозы. Суть её сводится к тому, что поддержание нескольких экосистемных функций на высоком уровне одновременно требует большего видового богатства, чем обеспечение любой одной функции в отдельности. Zavaleta et al. (2010) продемонстрировали этот эффект на экспериментальных лугах в Калифорнии: для удержания на приемлемом уровне трёх и более функций (продуктивность, устойчивость к инвазиям, стабильность во времени) необходимо было присутствие не менее восьми видов. Lundholm (2015) перенёс эту логику на зелёные крыши и подтвердил, что индекс мультифункциональности возрастал с увеличением числа высаженных жизненных форм, хотя абсолютные значения показателей оставались ниже, чем в наземных луговых экспериментах.

Механизм, обеспечивающий положительную связь между разнообразием и функционированием, в литературе трактуется двояко. Гипотеза комплементарности ниш (Loreau, Hector, 2001) предполагает, что виды с различающимися морфофизиологическими признаками полнее используют

доступные ресурсы за счёт разделения во времени и пространстве. Альтернативное объяснение — эффект отбора (Fox, 2005) — состоит в том, что в более богатых смесях выше вероятность присутствия одного высокопродуктивного вида, который и определяет общий отклик. Fargione et al. (2007) проследили сдвиг от эффекта отбора к комплементарности в ходе длительного лугового эксперимента: в первые годы доминировал вклад отдельных видов, но со временем межвидовые взаимодействия стали играть возрастающую роль. Для кровельных систем, в которых сукцессионные процессы протекают в условиях сильных экологических ограничений, соотношение этих механизмов может быть иным.

Методологически мы опирались на факторный план эксперимента, апробированный Dusza et al. (2017), с существенными модификациями, продиктованными спецификой умеренно-континентального климата. Ключевым отличием стало включение перезимовки в число обязательных регистрируемых параметров, а также продление наблюдений до трёх полных вегетационных сезонов, что позволило отследить отдалённые последствия зимних стрессов и оценить способность сообществ к самовосстановлению. Другим принципиальным решением стал отказ от горшечного моделирования в пользу натурных модулей, размещённых на эксплуатируемой кровле, поскольку микроклимат крыши (ветровой режим, инсоляция, ночное выхолаживание) принципиально отличается от условий наземного стационара.

Выбор факторов и их уровней определялся следующими соображениями. Глубина субстрата — наиболее очевидный лимитирующий параметр экстенсивных кровель. Dusza et al. (2017) сравнивали 10 и 30 см, однако 30 см выходит за пределы типичного диапазона для экстенсивных систем, который обычно ограничивается 15 см (Vijayaraghavan, 2016). Мы приняли две градации — 8 и 15 см — как соответствующие реальным техническим решениям для лёгких и полуэкстенсивных конструкций. Режим увлажнения включал два варианта: естественное увлажнение (только атмосферные осадки) и

дополнительный полив в периоды, когда запас продуктивной влаги в субстрате опускался ниже 30 % полной влагоёмкости. Этот порог выбран на основании данных Wolf и Lundholm (2008), показавших, что при влажности субстрата ниже данного уровня транспирация большинства кровельных видов резко снижается.

Растительные смеси формировали по принципу функционального контраста. Первая смесь представляла собой монокультуру Sedum acre — стандарт, принятый в отрасли [17]. Вторая объединяла четыре вида крассуляционных и тем самым моделировала типичную суккулентную кровлю. Третья состояла из засухоустойчивых злаков и разнотравья, лишённых CAM-метаболизма, что позволяло проверить, способны ли не-суккуленты формировать устойчивый покров на тонком субстрате. Четвёртая, многовидовая, включала представителей всех трёх групп и была призвана проверить гипотезу комплементарности в условиях максимальной функциональной гетерогенности.

Эксперимент заложен в апреле 2021 г. на плоской эксплуатируемой кровле учебного корпуса Казанского федерального университета (55°47′ с. ш., 49°07′ в. д.). Климат района — умеренно-континентальный, со среднегодовой температурой +4,6 °C, средней температурой января −10,4 °C и июля +20,2 °C, годовой суммой осадков около 560 мм. Кровля горизонтальная и не затенена соседними зданиями, поэтому полностью открыта воздействию ветра и солнечной радиации, что типично для экстенсивных зелёных крыш.

Модули представляли собой пластиковые контейнеры площадью 1 м² с дренажным слоем из керамзита (3 см), разделительным геотекстилем и субстратом заданной глубины. Субстрат готовили из смеси дроблёного керамзита (фракция 2–8 мм, 60 % по объёму), верхового торфа (20 %) и суглинистой почвы (20 %), что соответствует рецептурам, рекомендованным для экстенсивных систем в европейской практике (Ondoño, Bastida, Moreno, 2014). Физико-химические характеристики субстрата: объёмная масса 0,85 г/см³, полная влагоёмкость 42 %, pH 6,8, содержание органического углерода 3,1 %.

Таблица 1 - Схема факторного эксперимента

Фактор	Градации	Число уровней
Глубина субстрата	8 см, 15 см	2
Режим увлажнения	Естественный, supplemental-полив	2
Тип растительной смеси	Монокультура S. acre, смесь суккулентов, злаково-разнотравная, многовидовая	4

Источник: разработано автором.

Экспериментальная схема включает три фактора: глубину субстрата (8 и 15 см), режим увлажнения (естественный и дополнительный полив) и тип растительного сообщества (четыре варианта). Полный факторный план составляет 2 × 2 × 4 = 16 сочетаний. При пяти независимых модулях на каждое сочетание общее количество экспериментальных единиц равно 80.

Таблица 2 - Видовой состав экспериментальных смесей

Смесь	Включённые виды	Число видов	Семейства
Монокультура	Sedum acre	1	Crassulaceae
Суккулентная	Sedum acre, S. album, Hylotelephium telephium, H. maximum	4	Crassulaceae
Злаково-разнотравная	Festuca rubra, F. ovina, Achillea millefolium, Thymus serpyllum, Allium schoenoprasum	5	Poaceae, Asteraceae, Lamiaceae, Amaryllidaceae
Многовидовая	Все вышеперечисленные + Dianthus deltoides, Campanula rotundifolia, Potentilla tabernaemontani, Koeleria glauca	9	Crassulaceae, Poaceae, Asteraceae, Lamiaceae, Amaryllidaceae, Caryophyllaceae, Campanulaceae, Rosaceae

Источник: разработано автором.

Посадочный материал выращен из семян местного происхождения, собранных в природных популяциях Татарстана в 2020 г., за исключением Hylotelephium, для которых использовали вегетативные черенки. При закладке опыта растения высаживали с различной начальной численностью в зависимости от состава сообщества. Для монокультуры Sedum acre указана плотность 50 особей/м², для смешанных вариантов — ориентировочно 10–12 особей каждого вида на 1 м². При таком способе задания плотности общее количество высаженных особей зависит от видового богатства. Для четырёхвидовой смеси оно составляет 40–48 особей/м², для пяти видов — 50–60 особей/м², а для

тринадцативидовой смеси — 130–156 особей/м².

Регистрацию параметров вели в течение трёх вегетационных сезонов (2021–2023). Проективное покрытие каждого вида оценивали визуально с точностью до 5 % ежемесячно с мая по сентябрь. Выживаемость рассчитывали как долю особей, сохранивших живые побеги к моменту учёта, от числа высаженных. Надземную биомассу определяли методом укоса с учётных площадок 25×25 см в конце августа каждого года; материал высушивали при 70 °C до постоянной массы. Фенологические стадии фиксировали еженедельно по шкале BBCH. Для оценки самовозобновления подсчитывали число ювенильных особей (проростков и вегетативных отпрысков), появившихся без участия экспериментатора, на каждом модуле в июне и сентябре.

Перезимовку оценивали в конце апреля каждого года как долю особей, возобновивших рост после схода снега, от числа живых особей предыдущей осени. Температуру поверхности субстрата измеряли инфракрасным термометром (Testo 835-T1) в безоблачные дни в 13:00 на каждом модуле. Водоудерживающую способность определяли гравиметрически: модули насыщали до полного влагонасыщения, давали стечь гравитационной воде в течение 2 ч и взвешивали; разницу между массой влажного и сухого субстрата выражали в литрах на м².

Статистическую обработку выполняли в среде R (версия 4.2.1). Влияние факторов на количественные показатели анализировали трёхфакторным дисперсионным анализом с повторными измерениями (mixed-model repeated measures ANOVA), где модуль включён как случайный эффект. Для оценки выравненности видовых долей рассчитывали индекс Пиелу ($J = H'/\ln S$). Связь между видовым богатством и функциональными показателями проверяли квантильной регрессией (95-й перцентиль) по аналогии с подходом Lundholm (2015). Различия считали значимыми при $p < 0{,}05$.

Результаты исследования и их обсуждение. Первый вегетационный сезон выявил контрастную картину приживаемости между смесями. В

монокультуре S. acre к концу августа 2021 г. сохранилось 94 % высаженных особей, что ожидаемо для вида с выраженной ксерофитностью. Суккулентная смесь показала близкие значения: S. acre и S. album удержали 89–92 % особей, тогда как H. telephium и H. maximum — лишь 68 и 61 % соответственно. Злаково-разнотравная смесь на 8-сантиметровом субстрате без дополнительного полива потеряла за лето 47 % особей F. rubra и 38 % A. millefolium; на 15 см с поливом потери тех же видов составили 12 и 9 %. Многовидовая смесь заняла промежуточное положение: суккулентные компоненты приживались на уровне 85–90 %, злаки и разнотравье — 70–78 % на мелком субстрате и 82–88 % на глубоком.

Зимовка 2021/2022 г. стала критическим фильтром. Температура воздуха в январе опускалась до −28 °C при отсутствии устойчивого снежного покрова в течение трёх недель. S. acre перезимовал на 87 % модулей, сохранив 78 % осенней численности побегов. H. maximum не пережил зиму ни на одном модуле с глубиной 8 см; на 15 см выжили единичные особи (3–5 % от осенней численности). На модулях с глубиной субстрата 8 см и без дополнительного полива зарегистрировано выраженное снижение сохранности Festuca rubra. Однако согласно факторной схеме этот вид присутствует в двух типах смесей. При пяти повторениях каждого сочетания факторов число соответствующих модулей составляет 10. Dianthus deltoides и Campanula rotundifolia из многовидовой смеси перезимовали удовлетворительно (72–80 % побегов), тогда как Potentilla tabernaemontani потеряла более половины розеток на 8 см и около 20 % на 15 см.

После второй зимы (2022/2023) различия между вариантами стабилизировались. Виды, пережившие первый зимний стресс, демонстрировали более высокую устойчивость ко второму, что свидетельствует о селективном отборе наиболее толерантных генотипов в пределах высаженных популяций.

Таблица 3 - Перезимовка и самовозобновление по типам смесей (средние за 2022–2023 гг.)

Смесь	Глубина, см	Доля сохранившихся побегов после зимы, %	Число ювенильных особей на м² (июнь)	Число спонтанно вселившихся видов
Монокультура	8	76 ± 5	12 ± 3	1,4 ± 0,5
	15	81 ± 4	18 ± 4	1,8 ± 0,6
Суккулентная	8	64 ± 8	9 ± 2	1,2 ± 0,4
	15	72 ± 6	14 ± 3	2,0 ± 0,7
Злаково-разнотравная	8	38 ± 11	4 ± 2	2,6 ± 0,9
	15	67 ± 7	15 ± 4	3,2 ± 0,8
Многовидовая	8	58 ± 9	11 ± 3	2,4 ± 0,7
	15	74 ± 5	22 ± 5	3,8 ± 1,0

Источник: разработано автором.

Таблица 3 показывает, что глубина субстрата выступала более сильным предиктором перезимовки, чем тип смеси. На 15 см все смеси сохраняли не менее 67 % побегов, тогда как на 8 см злаково-разнотравная и суккулентная смеси опускались ниже 40–65 %. Самовозобновление, напротив, зависело от обоих факторов: в многовидовой смеси на глубоком субстрате в среднем отмечали 22 ювенильные особи на м², что в пять раз превышало соответствующий показатель злаково-разнотравной смеси на мелком субстрате. Спонтанное вселение новых видов, не входивших в первоначальную посадку, наиболее активно протекало на многовидовых модулях с глубиной 15 см, где к третьему сезону в среднем регистрировалось 3,8 дополнительных вида, преимущественно Erodium cicutarium, Cerastium fontanum и Poa annua.

К концу третьего сезона проективное покрытие модулей существенно различалось между вариантами. Монокультура S. acre на 8 см сформировала сомкнутый покров (85–90 %), однако его стабильность обеспечивалась единственным видом, что делало систему уязвимой к любому специфическому стрессу. Суккулентная смесь на той же глубине достигла лишь 60–65 % покрытия из-за выпадения Hylotelephium и медленного разрастания S. album. Злаково-разнотравная на мелком субстрате без полива так и не превысила 45 % покрытия, причём доминирование перешло к Th. serpyllum, оказавшемуся

наиболее засухоустойчивым компонентом этой группы.

На 15-сантиметровом субстрате с supplemental-поливом многовидовая смесь достигла 92 % покрытия к августу 2023 г. Примечательно, что структура покрова претерпела значительную перестройку: если в первый сезон доминировали S. acre и F. rubra, то к третьему году F. rubra уступила позиции F. ovina и K. glauca, а из разнотравья наибольшее покрытие обеспечили D. deltoides и C. rotundifolia. H. telephium сохранился в виде единичных куртин, не превышавших 5 % площади.

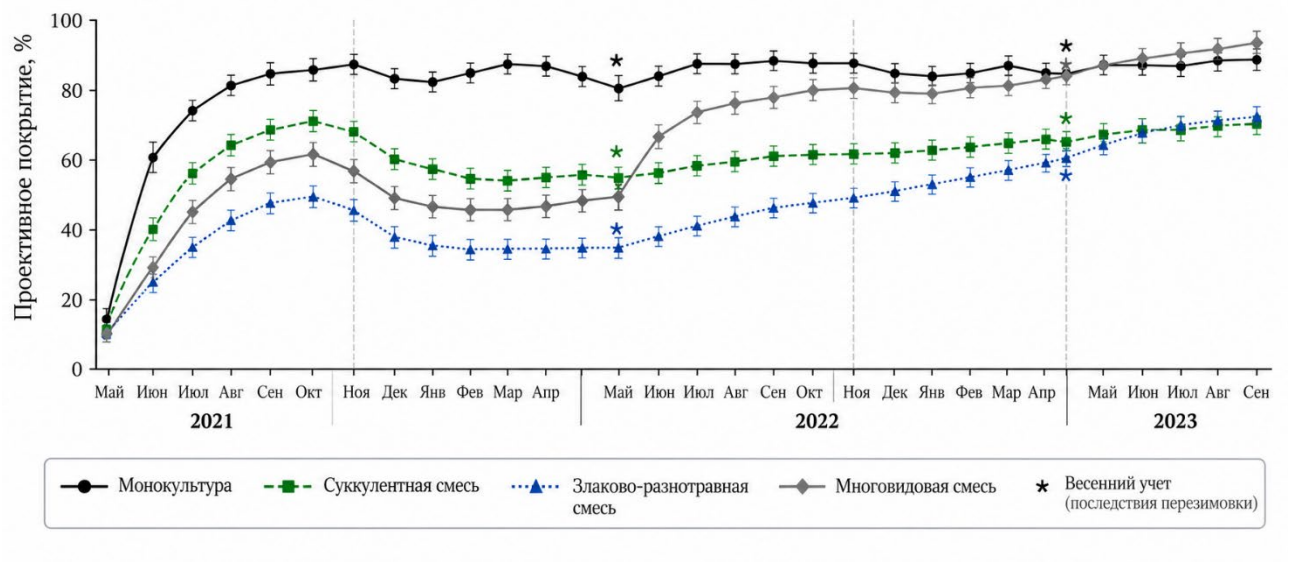


Рисунок 1 - Динамика среднего проективного покрытия (%) по типам смесей на субстрате глубиной 15 см с supplemental-поливом за три вегетационных сезона (2021–2023) (источник: разработано автором)

График наглядно демонстрирует два момента. Во-первых, после первой зимы покрытие резко снизилось во всех смесях, причём степень снижения была связана с долей несуккулентных видов. Во-вторых, только в многовидовой смеси после зимнего снижения наблюдалось устойчивое увеличение покрытия, тогда как в суккулентной смеси показатель стабилизировался на уровне ниже, чем в монокультуре. Это указывает на то, что функциональная гетерогенность обеспечивает не столько начальный темп формирования покрова, сколько способность к восстановлению после стрессового события.

Исходное число высаженных видов сохранялось только в монокультуре

(по определению). Во всех смесях к третьему сезону произошло выпадение части компонентов. В суккулентной смеси H. maximum исчез полностью, а H. telephium сохранился лишь на модулях с глубиной 15 см, что снизило фактическое богатство с четырёх до двух-трёх видов. Злаково-разнотравная на 8 см без полива утратила A. millefolium и A. schoenoprasum, сохранив три вида. Многовидовая смесь на 15 см с поливом удержала семь из девяти высаженных таксонов (выпали H. maximum и A. schoenoprasum), при этом спонтанное вселение добавило три-четыре вида, доведя суммарное богатство до десяти-одиннадцати.

Индекс Пиелу (J) отражал степень доминирования в сообществах. Монокультура по определению имела J = 1, но это тривиальный случай. В суккулентной смеси J снизился с 0,82 в первый сезон до 0,55 к третьему, что отражало нарастающее доминирование S. acre над S. album. Злаково-разнотравная смесь на субстрате глубиной 15 см поддерживала J на уровне 0,71–0,76, поскольку доля ни одного вида в проективном покрытии не превышала 30 %. Многовидовая смесь характеризовалась наиболее стабильной выравненностью (J = 0,68–0,73), поскольку доминирование суккулентов компенсировалось разрастанием злаков и разнотравья в разные фенологические периоды.

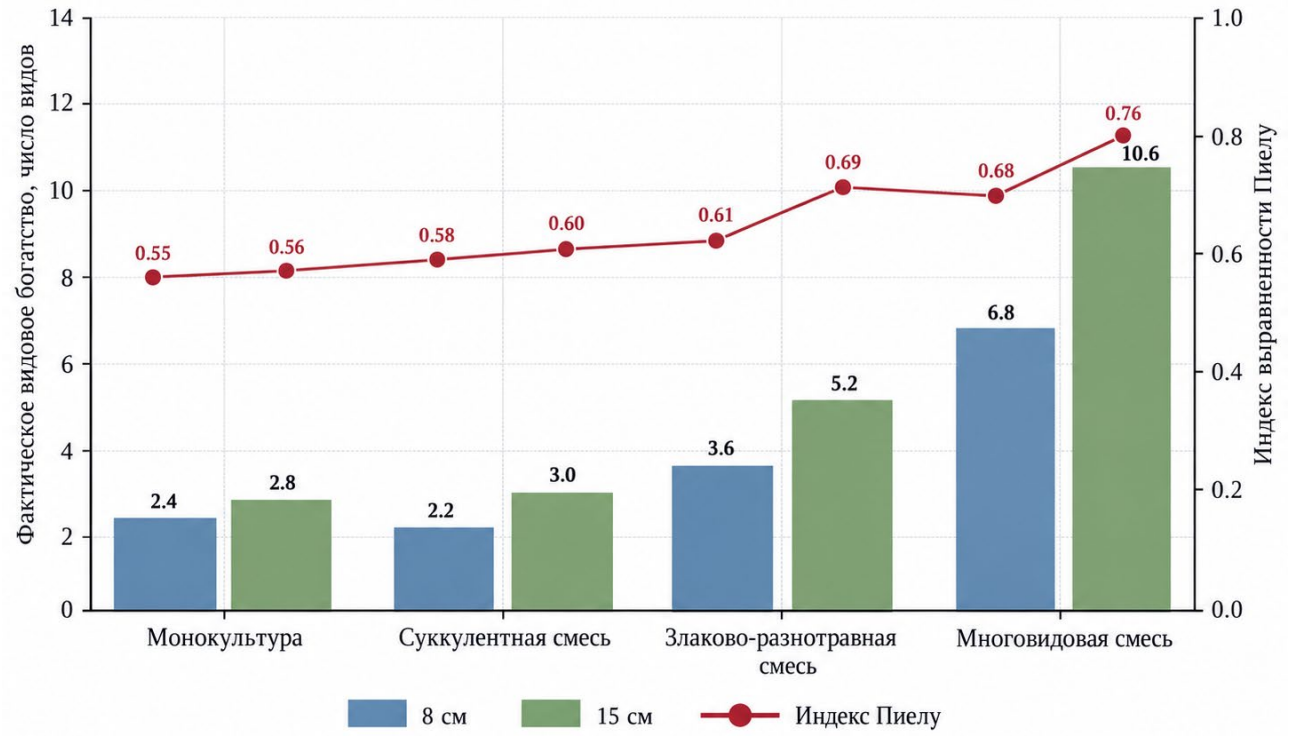


Рисунок 2 - Влияние глубины субстрата на фактическое видовое богатство (столбцы, левая ось) и индекс выравненности Пиелу (линия с маркерами, правая ось) к концу третьего сезона (август 2023) (источник: разработано автором)

Рисунок 2 подтверждает, что увеличение глубины субстрата с 8 до 15 см наиболее существенно повлияло на многовидовую и злаково-разнотравную смеси, тогда как суккулентные сообщества оказались менее чувствительны к этому фактору. Это согласуется с данными Dusza et al. (2017), которые также отметили, что эффект глубины модулируется функциональным составом: виды с глубокой корневой системой (злаки) сильнее откликались на увеличение почвенного профиля, чем суккуленты с поверхностной корневой сетью.

Средняя надземная биомасса к концу третьего сезона варьировала от 120 г/м² (суккулентная смесь на 8 см) до 580 г/м² (многовидовая на 15 см с поливом). Трёхфакторный ANOVA выявил значимые эффекты глубины ($F = 34,2$, $p < 0,001$), типа смеси ($F = 28,7$, $p < 0,001$) и их взаимодействия ($F = 5,8$, $p = 0,002$). Влияние режима полива оказалось значимым только для не-суккулентных смесей ($F = 12,4$, $p < 0,001$ для злаково-разнотравной; $F = 0,9$, $p = 0,34$ для монокультуры).

Фенологические наблюдения показали, что компоненты многовидовой смеси последовательно сменяли друг друга в цветении. S. acre цвёл в июне, D. deltoides и C. rotundifolia — в июле, A. millefolium и T. serpyllum — с июля по август, H. telephium — в сентябре. Такая последовательность обеспечивала непрерывное присутствие цветущих растений на модуле в течение четырёх месяцев, что создавало кормовую базу для насекомых-опылителей. В монокультуре цветение S. acre было ограничено тремя-четырьмя неделями в июне, после чего модуль терял энтомофильную привлекательность.

Водоудерживающая способность модулей зависела как от свойств субстрата, так и от характеристик растительного покрова. На модулях без растительности (контрольные) 15-сантиметровый субстрат удерживал 48 л/м², а 8-сантиметровый — 26 л/м². Растительность модифицировала эти значения: многовидовая смесь на 15 см увеличила водоудержание до 54 л/м² за счёт накопления органического вещества и улучшения структуры субстрата корнями, тогда как монокультура на 8 см практически не изменила исходного значения (27 л/м²). Злаково-разнотравная смесь на 15 см показала промежуточный результат (50 л/м²).

Температура поверхности в полдень в июле 2023 г. на оголённом субстрате достигала 58 °C. Монокультура S. acre снижала её до 44 °C, многовидовая смесь на 15 см — до 36 °C. Разница между этими двумя вариантами (8 °C) статистически значима ($t = 4,7$, $p < 0,001$) и объясняется как более высоким проективным покрытием, так и большей транспирационной активностью не-суккулентных компонентов.

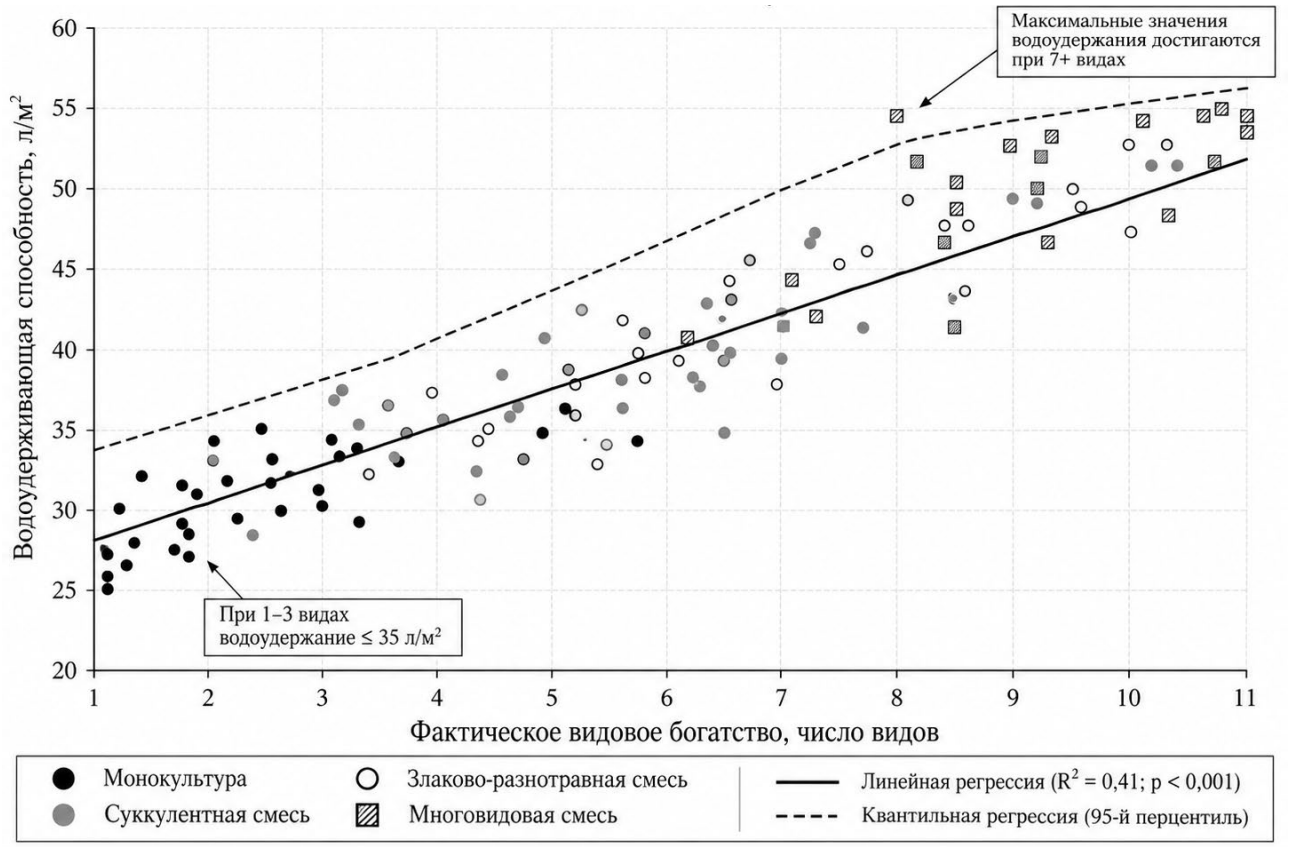


Рисунок 3 - Связь между фактическим видовым богатством (ось абсцисс) и водоудерживающей способностью модуля (л/м², ось ординат) по данным августа 2023 г. для всех 80 модулей (источник: разработано автором)

Рисунок 3 показывает закономерность, описанную Lundholm (2015): верхняя граница водоудерживающей способности возрастает с увеличением видового богатства, тогда как нижняя граница остаётся стабильной. Это означает, что высокое богатство не гарантирует высокой водоудерживающей способности, но без него достижение максимальных значений невозможно.

За три года на модулях зарегистрировано 14 видов, не входивших в первоначальную посадку. Наиболее частыми колонистами оказались Poa annua, Erodium cicutarium, Cerastium fontanum, Stellaria media и Taraxacum officinale. Спонтанное вселение происходило преимущественно на модулях с глубиной 15 см и многовидовым составом, где более рыхлая структура покрова и обогащённый органикой субстрат создавали благоприятные условия для прорастания заносных семян. На монокультурных модулях S. acre плотная дернина эффективно препятствовала укоренению пришлых видов.

Важно отметить, что ни один из спонтанно вселившихся видов не достиг доминирования и не вытеснил высаженные компоненты. Poa annua и Stellaria media вегетировали преимущественно весной и отмирали к середине лета, не конкурируя с основными видами за ресурсы в критический засушливый период. Taraxacum officinale закрепился на трёх модулях многовидовой смеси, но его проективное покрытие не превышало 5 %.

Полученные данные подтверждают, что многовидовые растительные сообщества на экстенсивных зелёных крышах в умеренно-континентальном климате способны формировать устойчивый покров, превосходящий монокультуры по совокупности функциональных показателей, однако эта способность реализуется только при достаточной глубине субстрата. Взаимодействие между факторами, выявленное в нашем эксперименте, согласуется с выводами Dusza et al. (2017): на мелком субстрате (8 см) экстремальность условий нивелировала преимущества видового разнообразия, и все смеси, кроме монокультуры S. acre, демонстрировали низкое покрытие и высокую смертность. Увеличение глубины до 15 см снимало часть ограничений и позволяло проявиться эффектам комплементарности.

Зимний стресс выступил решающим фильтром, определившим итоговый состав сообществ. Выпадение H. maximum и значительная редукция H. telephium показывают, что крупные крассуляционные, успешно используемые на кровлях в Западной Европе (Dusza et al., 2017), не пригодны для экстенсивных систем в условиях Среднего Поволжья без дополнительного утепления субстрата. Это ограничение не было бы выявлено в односезонном эксперименте и подчёркивает необходимость многолетних наблюдений при подборе ассортимента для регионов с холодной зимой. MacIvor и Lundholm (2011) фиксировали аналогичную картину в приморском климате Галифакса, где зимы значительно мягче казанских, что позволяет предположить, что зимостойкость — наиболее критичный параметр отбора для любых кровельных систем в зонах с отрицательными температурами.

Сдвиг доминирования в многовидовой смеси от F. rubra к F. ovina и K. glauca в ходе трёх сезонов представляет интерес с точки зрения теории сукцессии на антропогенных субстратах. F. rubra, обладая более высокой продуктивностью в благоприятных условиях, оказалась менее толерантной к повторяющимся засухам и зимним стрессам, чем более мелкая и ксероморфная F. ovina. Подобная смена доминантов описана Fargione et al. (2007) в луговом эксперименте, где эффект отбора (доминирование наиболее продуктивного вида) постепенно уступал место комплементарности. На кровельных модулях этот процесс протекал в сжатые сроки: уже ко второму сезону состав стабилизировался вокруг видов, сочетающих умеренную продуктивность с высокой стрессоустойчивостью.

Непрерывность цветения в многовидовой смеси (июнь — сентябрь) имеет практическое значение для поддержания популяций опылителей в городской среде. Хотя мы не проводили прямых учётов энтомофауны, что потребовало бы отдельного зоологического исследования, фиксация фенологических фаз позволяет заключить, что обеспеченность насекомых-антофилов цветочными ресурсами на многовидовых модулях была существенно выше, чем на монокультурных. Cook-Patton и Bauerle (2012) в обзоре литературы о зелёных крышах указывали на потенциальную роль кровельных фитоценозов как рефугиумов для опылителей, но подчёркивали дефицит эмпирических данных. Наши фенологические наблюдения заполняют часть этого пробела, показывая, что правильно подобранный набор видов способен обеспечить цветение на протяжении всего вегетационного периода.

Спонтанное заселение модулей заносными видами не несло угрозы для высаженных сообществ, но указывало на то, что даже в экстремальных условиях кровли тонкий слой субстрата может служить средой для укоренения рудеральных таксонов. Это наблюдение перекликается с данными Brenneisen (2006) и Oberndorfer и Lundholm (2009) о роли окружающих местообитаний в формировании видового пула. Практический вывод состоит в том, что при

эксплуатации многовидовых кровель необходимо периодическое удаление нежелательных колонистов (прежде всего Taraxacum и крупных злаков), которые в перспективе могут нарушить сложившуюся структуру покрова.

Квантильная регрессия водоудержания от видового богатства (рис. 3) воспроизвела закономерность, установленную Lundholm (2015): верхний перцентиль функционального показателя возрастал с числом видов, хотя дисперсия при низком богатстве оставалась высокой. Это означает, что для достижения максимального водоудержания необходимо присутствие не менее семи-восьми видов, но само по себе высокое богатство не гарантирует результата — важен функциональный состав. Модули с преобладанием суккулентов при богатстве 3–4 вида удерживали меньше воды, чем злаково-разнотравные при том же числе видов, что объясняется различиями в архитектуре корневых систем и способности к транспирации.

Результаты проведённого опыта позволяют сопоставить два фактически изученных уровня глубины субстрата — 8 и 15 см. Для злаково-разнотравных и многовидовых сообществ в исследованных условиях более глубокий субстрат сопровождался улучшением отдельных показателей сохранности растений.

Растительная смесь должна включать не менее шести-семи видов из трёх и более семейств, с обязательным присутствием местных ксероморфных злаков (*F. ovina*, *K. glauca*) и низкорослого разнотравья (*D. deltoides*, *C. rotundifolia*, *T. serpyllum*). Крупные крассуляционные (*Hylotelephium* spp.) следует исключить из ассортимента для экстенсивных систем в регионах с зимними температурами ниже −20 °C. *Sedum acre* и *S. album* сохраняют значение как страховочные виды, обеспечивающие быстрое начальное покрытие и защиту субстрата от эрозии.

Полив в первый вегетационный сезон необходим для укоренения не-суккулентных компонентов; в последующие годы supplemental-увлажнение рекомендуется только в периоды, когда запас продуктивной влаги падает ниже 30 % полной влагоёмкости. Весенний осмотр после схода снега должен включать учёт перезимовавших особей и подсадку погибших компонентов из резервного

посадочного материала. Удаление спонтанно вселившихся видов с мощной корневой системой (прежде всего *Taraxacum*) следует проводить не реже двух раз за сезон.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает назревшую необходимость отхода от упрощенных схем озеленения кровель, исторически базировавшихся на монокультурах суккулентов. Переход к многовидовым фитоценозам с участием злаков и низкорослого разнотравья изменяет не только видовой состав, но и функциональные свойства кровельных сообществ. Полученные данные показывают, что функционально разнородные сообщества эффективнее сглаживают температурные колебания и удерживают влагу, чем сообщества из одного или двух таксонов. Этот вывод согласуется с концепцией мультифункциональности, согласно которой максимальный уровень экосистемных услуг достигается при сочетании видов с различными стратегиями ресурсопотребления и морфофизиологическими адаптациями.

Однако простое механическое смешивание семян различных видов не гарантирует создания устойчивой системы. Ключевым ограничивающим фактором в условиях умеренно-континентального климата является зимний стресс, определяющий отбор устойчивых видов. Виды с высокой продуктивностью в первый вегетационный сезон в большинстве случаев выпадали после первой зимовки на тонком слое субстрата. Выявленная зависимость выживаемости не-суккулентных компонентов от глубины почвенного профиля указывает на то, что устойчивость искусственного фитоценоза жестко обусловлена физическими параметрами среды обитания. Таким образом, успешная интродукция требует не только подбора засухоустойчивых таксонов, но и создания адекватного объема субстратной матрицы, способной смягчать экстремальные микроклиматические воздействия.

Важным аспектом, отличающим разработанные многовидовые сообщества от традиционных седумных матов, является их способность к динамическому саморегулированию. Наблюдаемое в ходе эксперимента замещение доминантов

и постепенное включение в состав фитоценоза спонтанно вселившихся видов свидетельствует о формировании сукцессионных процессов, характерных для наземных аналогов. При этом высаженные компоненты не теряют конкурентного преимущества, а занимают устойчивые ниши. Подобная пластичность позволяет кровельным экосистемам адаптироваться к непредсказуемым климатическим аномалиям, что особенно актуально в контексте современных изменений городской среды. Искусственно созданный фитоценоз перестает быть статичной декоративной конструкцией и обретает свойства полноценной, хотя и упрощенной, экологической системы.

В практическом плане результаты работы диктуют переход от интуитивного подбора растений к научно обоснованному проектированию кровельных сообществ. Для регионов с выраженной сезонностью и суровыми зимами приоритет должен отдаваться местным флористическим комплексам и видам, прошедшим естественный отбор в аналогичных почвенно-климатических условиях. Дальнейшее развитие инженерной ботаники в данном направлении должно быть сосредоточено на изучении долгосрочных сукцессионных сдвигов и оптимизации субстратных смесей, обеспечивающих не только стартовый рост, но и долгосрочное поддержание замкнутости биогеохимических циклов. Только такой комплексный подход позволит трансформировать зеленые крыши из пассивных элементов архитектуры в активные компоненты городской экологической инфраструктуры.

Список литературы

1. Бабич Г. О., Васенев В. И., Корытина М. А., Сморкалов И. А., Сальник Н. В., Осина К. В., Гунина А. А. Закономерности формирования флористического разнообразия на зеленых крышах Москвы и Екатеринбурга и роль прилегающих газонов как источника колонизаторов // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2026. № 3. С. 110–123. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2026-81-3-110-123.
2. Rivière L., Meeûs S., Mahy G. Stress Tolerant Species Are Keys to Plant

Communities Success on Extensive Green Roof: An Experimental Test of CSR Strategy Dynamic // Urban Ecosystems. 2024. Vol. 27. P. 591–600. DOI: 10.1007/s11252-023-01479-w.

3. Smorkalov I., Vasenev V., Babich G., Gorbov S., Gubaeva I., Sarzhanov D., Sayanov A., Korytina M., Gunina A. Diversity or Standardization: CO_2 Emission from Universal and Locally Specific Green Roof Constructions Along a Climatic Gradient // Journal of Soils and Sediments. 2026. Vol. 26. No. 7. Art. 238. DOI: 10.1007/s11368-026-04431-5.

4. van der Kolk H.-J., van den Berg P., van Veen T., Bezemer T. M. Substrate Composition Impacts Long-Term Vegetation Development on Blue-Green Roofs: Insights from an Experimental Roof and Greenhouse Study // Ecological Engineering. 2023. Vol. 186. Art. 106847. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106847.

5. Владыкина В. Д., Третьякова А. С., Груданов Н. Ю., Хриченков А. В., Бурцев А. Г. Перспективные варианты растительных сообществ для экстенсивного озеленения кровель // Труды НОЦ — Ботанический сад МГУ. 2026. Вып. 10.

6. Ndayambaje P., MacIvor J. S., Isabwe A., Cadotte M. W. Plant Functional Traits and Species Mixtures Drive Extensive Green Roof Community Performance at the Establishment Stage // Ecological Solutions and Evidence. 2026. Vol. 7. No. 3. Art. e70274. DOI: 10.1002/2688-8319.70274.

7. 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. No. 15. Art. 2806. DOI: 10.3390/w15152806.

8. Корытина М. А., Гунина А. А., Саянов А. А., Васенев В. И. Методология создания открытой лаборатории по изучению зеленых кровель // Вестник ЗКУ. 2025. № 1 (97). С. 610–620. DOI: 10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.97(1).49.

9. Frisk C. A., Hanslin H. M. Optimizing Plant Species Composition of Green Roofs for Ecological Functionality and Biodiversity Conservation // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. Art. 12. DOI: 10.1007/s11252-024-01657-4.

10. 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. No. 5. Art. 735. DOI: 10.3390/plants14050735.

11. Xu Y., Liao Z., Liu J., Liu C., Li Y. Unirrigated Extensive Green Roofs in Humid Subtropics – Plant Selection and Substrate Design for Low Maintenance and Climate Resilience // Urban Forestry & Urban Greening. 2024. Vol. 101. Art. 128554. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128554.

12. Rivière L., Sellier A., Dutoit T., Vidaller C., Buisson E., Mahy G. The Contribution of Seedbank to the Green Roof Plant Community Dynamics Analogous to Semi-Natural Grasslands // Frontiers in Ecology and Evolution. 2023. Vol. 11. Art. 1152319. DOI: 10.3389/fevo.2023.1152319.

13. Bellini A., Bartoli F., Kumbaric A., Casalini R., Caneva G. Evaluation of Mediterranean Perennials for Extensive Green Roofs in Water-Limited Regions: A Two-Year Experiment // Ecological Engineering. 2024. Vol. 209. Art. 107399. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2024.107399.

14. Heim A., Chagnon P.-L., Haughian S. et al. Community Assembly of Mosses, Lichens, and Succulents Across a Green Roof Chronosequence in Malmö, Sweden // Urban Forestry & Urban Greening. 2026. Vol. 117. Art. 129303. DOI: 10.1016/j.ufug.2026.129303.

15. 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. Art. 107562. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107562.

16. Ravnjak B., Malovrh K., Dinevski M., Bavcon J. Small-Scale Green Roofs with Native Plant Species Installed on Bus Stop Shelters // Horticulturae. 2026. Vol. 12. No. 1. Art. 120. DOI: 10.3390/horticulturae12010120.

17. Schrieke D., Szota C., Williams N. S. G., Farrell C. Evaluating the Effectiveness of Spontaneous Vegetation for Stormwater Mitigation on Green Roofs // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 898. Art. 165643. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165643.

References

1. Babich G. O., Vasenev V. I., Kory`tina M. A., Smorkalov I. A., Sal`nik N. V., Osina K. V., Gunina A. A. Zakonomernosti formirovaniya floristicheskogo raznoobraziya na zeleny`x kry`shax Moskvy` i Ekaterinburga i rol` prilegayushhix gazonov kak istochnika kolonizatorov // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie. 2026. № 3. S. 110–123. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2026-81-3-110-123.

2. Rivière L., Meeûs S., Mahy G. Stress Tolerant Species Are Keys to Plant Communities Success on Extensive Green Roof: An Experimental Test of CSR Strategy Dynamic // Urban Ecosystems. 2024. Vol. 27. P. 591–600. DOI: 10.1007/s11252-023-01479-w.

3. Smorkalov I., Vasenev V., Babich G., Gorbov S., Gubaeva I., Sarzhanov D., Sayanov A., Korytina M., Gunina A. Diversity or Standardization: CO_2 Emission from Universal and Locally Specific Green Roof Constructions Along a Climatic Gradient // Journal of Soils and Sediments. 2026. Vol. 26. No. 7. Art. 238. DOI: 10.1007/s11368-026-04431-5.

4. van der Kolk H.-J., van den Berg P., van Veen T., Bezemer T. M. Substrate Composition Impacts Long-Term Vegetation Development on Blue-Green Roofs: Insights from an Experimental Roof and Greenhouse Study // Ecological Engineering. 2023. Vol. 186. Art. 106847. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106847.

5. Vlady`kina V. D., Tret`yakova A. S., Grudanov N. Yu., Xrichenkov A. V., Burcev A. G. Perspektivny`e varianty` rastitel`ny`x soobshhestv dlya e`kstensivnogo ozeleneniya krovel` // Trudy` NOCz — Botanicheskij sad MGU. 2026. Vy`p. 10.

6. Ndayambaje P., MacIvor J. S., Isabwe A., Cadotte M. W. Plant Functional Traits and Species Mixtures Drive Extensive Green Roof Community Performance at the Establishment Stage // Ecological Solutions and Evidence. 2026. Vol. 7. No. 3. Art. e70274. DOI: 10.1002/2688-8319.70274.

7. 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. No. 15. Art. 2806. DOI: 10.3390/w15152806.

8. Kory`tina M. A., Gunina A. A., Sayanov A. A., Vasenev V. I. Metodologiya sozdaniya otkry`toj laboratorii po izucheniyu zeleny`x krovel` // Vestnik ZKU. 2025. № 1 (97). S. 610–620. DOI: 10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.97(1).49.

9. Frisk C. A., Hanslin H. M. Optimizing Plant Species Composition of Green Roofs for Ecological Functionality and Biodiversity Conservation // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. Art. 12. DOI: 10.1007/s11252-024-01657-4.

10. 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. No. 5. Art. 735. DOI: 10.3390/plants14050735.

11. Xu Y., Liao Z., Liu J., Liu C., Li Y. Unirrigated Extensive Green Roofs in Humid Subtropics – Plant Selection and Substrate Design for Low Maintenance and Climate Resilience // Urban Forestry & Urban Greening. 2024. Vol. 101. Art. 128554. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128554.

12. Rivière L., Sellier A., Dutoit T., Vidaller C., Buisson E., Mahy G. The Contribution of Seedbank to the Green Roof Plant Community Dynamics Analogous to Semi-Natural Grasslands // Frontiers in Ecology and Evolution. 2023. Vol. 11. Art. 1152319. DOI: 10.3389/fevo.2023.1152319.

13. Bellini A., Bartoli F., Kumbaric A., Casalini R., Caneva G. Evaluation of Mediterranean Perennials for Extensive Green Roofs in Water-Limited Regions: A Two-Year Experiment // Ecological Engineering. 2024. Vol. 209. Art. 107399. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2024.107399.

14. Heim A., Chagnon P.-L., Haughian S. et al. Community Assembly of Mosses, Lichens, and Succulents Across a Green Roof Chronosequence in Malmö, Sweden // Urban Forestry & Urban Greening. 2026. Vol. 117. Art. 129303. DOI: 10.1016/j.ufug.2026.129303.

15. 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. Art. 107562. DOI:

10.1016/j.ecoleng.2025.107562.

16. Ravnjak B., Malovrh K., Dinevski M., Bavcon J. Small-Scale Green Roofs with Native Plant Species Installed on Bus Stop Shelters // Horticulturae. 2026. Vol. 12. No. 1. Art. 120. DOI: 10.3390/horticulturae12010120.

17. Schrieke D., Szota C., Williams N. S. G., Farrell C. Evaluating the Effectiveness of Spontaneous Vegetation for Stormwater Mitigation on Green Roofs // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 898. Art. 165643. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165643.

Статья поступила в редакцию 13.08.2026; одобрена после рецензирования 10.09.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 13.08.2026; approved after peer review 10.09.2026; accepted for publication 16.10.2026.