

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.95-106

«Зеленая» крыша как инструмент экологической безопасности городских территорий

Валерий Николаевич Азаров¹, Елена Владимировна Сысоева²,
Дена Карим-Султанович Батаев³

¹ Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

³ Комплексный научно-исследовательский
институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН); г. Грозный, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается влияние «зеленых» крыш на экологическую безопасность городов. Частицы мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ и PM_{10} влияют на здоровье человека, уменьшая не только продолжительность трудоспособного периода жизни, но и угрожая жизни. Поэтому снижение концентрации этих твердых частиц (ТЧ) в воздухе городских территорий — серьезная проблема специалистов в области техносферной безопасности. Одним из возможных решений проблемы является повсеместное внедрение «зеленых» крыш для озеленения городов.

Материалы и методы. Изучается способность «зеленых» крыш снижать плотность твердых взвешенных частиц PM различной фракции и связанных с ними микроэлементов несколькими видами многолетних растений в течение весны, лета и осени. Детоксикация воздуха окружающей городской среды может происходить благодаря фиторемедиации, позволяющей использовать растения для снижения загрязнения воздуха. Растения, находящиеся на уровне крыш зданий общественного назначения, могут улавливать тяжелые металлы (ТМ) из воздуха, особенно на селитебных территориях, где крыши зданий имеют значительные площади. Проведена оценка способности растительного покрова улавливать частицы мелкодисперсной пыли в воздушной среде городских территорий на основе анализа восьми видов растений. Для экспериментального исследования выбраны растения с разнообразной морфологией, которая оказывает влияние на улавливание ТМ.

Результаты. Исследование подтверждает важность выбора растений с особыми структурными особенностями для зеленой городской инфраструктуры. Высокие уровни ТМ на «зеленых» крышах обнаружены в летний период года, что связано с условиями окружающей среды и активностью работы промышленных предприятий.

Выводы. На содержание ТЧ в растениях влияет также смена времен года. Исследование подчеркивает важность изучения удержания ТМ частицами разного размера растениями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: «зеленая» крыша, экологическая безопасность городских территорий, мелкодисперсная пыль $PM_{2,5}$ и PM_{10} , загрязнение города, урбанизация, городской остров тепла, фиторемедиация, метод селективного растворения листа с применением хлороформа

Благодарности. Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс), научный проект «Теоретические основы выбора эффективных решений, направленных на повышение рациональности использования и экологической безопасности городских территорий» (соглашение № 25-29-20187).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Азаров В.Н., Сысоева Е.В., Батаев Д.К.-С. «Зеленая» крыша как инструмент экологической безопасности городских территорий // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 95–106. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.95-106

Автор, ответственный за переписку: Елена Владимировна Сысоева, SysoevaEV@mgsu.ru.

Green roof as an environmental safety tool for urban areas

Valery N. Azarov¹, Elena V. Sysoeva², Dena K.-S. Bataev³

¹ Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

³ Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences (CI RAS); Grozny, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper is devoted to the impact of “green” roofs on the environmental safety of cities. Since fine dust particles $PM_{2.5}$ and PM_{10} seriously affect human health, reducing not only the length of the working age, but also threatening life at all. Therefore, reducing the concentration of these solid particles in the air of urban areas is a serious problem for specialists in the field of technosphere safety. One possible solution to this problem is the widespread use of green roofs to green cities.

Materials and methods. The proposed work studies the ability of green roofs to reduce the density of particulate matter PM of various fractions and associated trace elements by several species of perennial plants during spring, summer and autumn. Detoxification of the air of the surrounding urban environment can occur due to phytoremediation, which allows the use of plants in reducing air pollution. Plants located at the level of the roofs of public buildings can capture heavy metals from the air, especially in residential areas where the roofs of buildings have significant areas. The paper assesses the ability of vegetation cover to capture fine dust particles in the air of urban areas based on the analysis of eight plant species. The experimental study focuses on plants with leaves of diverse morphology, which affects the capture of heavy metals.

Results. The study confirms the importance of choosing plants with special structural features for green urban infrastructure. High levels of heavy metals on green roofs were found in the summer season, which is associated with environmental conditions and the activity of industrial enterprises.

Conclusions. The content of solid particles in plants is also affected by the changing seasons. Rainfall in spring washes particles off the leaves, in summer gardening work captures and increases the level of density of solid dust particles. The study highlights the importance of studying the retention of heavy metals by particles of different sizes in plants.

KEYWORDS: green roof, environmental safety of urban areas, fine particulate matter $PM_{2.5}$ and PM_{10} , urban pollution, urbanization, urban heat island, phytoremediation, selective chloroform leaf dissolution method

Acknowledgments. This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation for “Conducting Fundamental Scientific Research and Exploratory Scientific Research by Small Individual Research Groups” (regional competition), under the research project “Theoretical Foundations for Selecting Effective Solutions Aimed at Improving the Rational Use and Environmental Safety of Urban Areas” (agreement No. 25-29-20187).

FOR CITATION: Azarov V.N., Sysoeva E.V., Bataev D.K.-S. Green roof as an environmental safety tool for urban areas. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):95-106. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.95-106 (rus.).

Corresponding author: Elena V. Sysoeva, SysoevaEV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Частицы мелкодисперсной пыли ($PM_{2.5}$ и PM_{10}) представляют собой одну из основных составляющих загрязнения воздуха, оказывая серьезное воздействие на здоровье человека и экологические системы городской среды. Снижение их концентрации в воздухе городских территорий — одна из важнейших задач специалистов в области техносферной безопасности.

Загрязнение территорий увеличивается благодаря нарастающему росту строительства в больших и крупных городах России, увеличению плотности транспортной системы и т.д. При этом, по данным Росстата, изменение численности за последние 30 лет не произошло. Согласно последним сведениям, с 1994 г. на территории России проживало 148 355 867 чел., что на 2 205 078 чел. больше, чем на 2024 г., т.е. на 1,5 % меньше. Резкое уменьшение произошло в 2009 г., когда население уменьшилось на 4 %, после чего начался медленный и незначительный рост численности россиян.

Одновременно с уменьшением численности коренного населения России численность автомобильного транспорта в России с 1990 по 2015 г. увеличилась с 8,7 до 44,3 млн. Парк автомобилей продолжает расти и в последнее десятилетие до 46,8 млн, т.е. за последние 35 лет парк личного автотранспорта вырос в 5 раз.

Поскольку увеличение объемов строительства приводит к уменьшению парковых зон, природного

и искусственного озеленения, необходимо принять меры к дополнительному озеленению городских территорий, которые смогут компенсировать потерянные площади на городских площадках строительства.

В крупных городах большие площади занимают торговые центры и другие здания общественного назначения (больницы, детские сады, общеобразовательные учреждения), имеющие значительные площади крыш. Эти территории дают повышение температурных полей вокруг придомовой территории и концентрируют пылевые загрязнения. Все это доказывает необходимость использования таких крыш для эксплуатации их в качестве улавливателей пыли и уменьшения температуры благодаря естественному травяному покрову.

Быстрый рост городского населения в г. Москве ускорил внедрение «зеленых» крыш для озеленения городов на юге России. Это имеет экологические преимущества и помогает снизить негативные последствия урбанизации, такие как загрязнение воздуха и эффект городского острова тепла [1–3]. «Зеленые» крыши — это одно из решений для сохранения зеленых насаждений в городах с высокой плотностью населения и улучшения окружающей среды. Устройство данных конструкций на зданиях и сооружениях улучшает экологию городов, помогая противостоять изменению климата и снижая загрязнение воздуха твердыми частицами [4, 5].

Антропогенная деятельность на городских территориях (сжигание топлива, промышленность, стро-

ительство) создает загрязнение взвешенными веществами, имеющими в составе различные химические элементы. Наиболее опасными для здоровья городского населения являются частицы мелкодисперсной пыли $PM_{2,5}$ и PM_{10} , так как они могут попадать в дыхательную систему человека [6–8].

Концентрация взвешенных веществ в воздухе городской территории зависит от сезонности, топографии территории и метеорологических показателей [9]. Химический состав включает сульфаты, нитраты, углеводороды, металлы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучается способность конструкций «зеленых» крыш снижать уровень загрязнения воздуха путем анализа улавливания частиц РМ и связанных с ними микроэлементов восемью видами многолетних растений в течение весны, лета и осени. Полученные результаты подчеркивают значительную вариативность в улавливании РМ как внутри видов, так и в зависимости от сезонных изменений. Особенно высокие показатели были зафиксированы летом из-за увеличения плотности листвы и загрязнения окружающей среды.

Наиболее высокий уровень улавливания тяжелых металлов (ТМ) в РМ показали два вида растений — *Sedum spectabile* (очиток видный) и *Spiraea japonica* (спирея японская) благодаря их богатому восковому покрытию и густой листве. В то же время *Betula nana* (береза карликовая) продемонстрировала высокую способность улавливать такие элементы, как марганец и цинк. Сезонные изменения в концентрации частиц РМ, связанные с метеорологическими показателями территории субтропического климата в г. Москве, и изменения содержания воска на листовом покрове растений в осенний период подчеркивают важность адаптивных свойств растений для эффективного улавливания загрязняющих веществ. Эти выводы подчеркивают высокий уровень способности «зеленых» крыш в улучшении качества воздуха в городской среде и необходимость разработки стратегий, учитывающих характеристики конкретных видов растений для максимальной эффективности фиторемедиации круглый год. Расширение применения разнообразной растительности на «зеленых» крышах может значительно увеличить их положительное воздействие на окружающую городскую среду и здоровье населения.

Растения вносят существенный вклад в снижение загрязнения воздуха через фиторемедиацию — экологически безопасный подход, использующий растения для детоксикации окружающей среды [10].

Исследования показывают, что растения могут накапливать тяжелые металлы в зависимости от формы листьев и содержания воска [11–13]. «Зеленые» крыши могут быть полезны для фильтрации и улавливания ТМ из воздуха в городских районах, но требуются оценка их эффективности в зависимо-

сти от климатических и метеорологических условий конкретной территории и разработка стратегии по озеленению для совершенствования системы экологической безопасности городской воздушной среды.

Цель исследования — оценка способности растительного покрова улавливать частицы мелкодисперсной пыли в воздушной среде городских территорий и разработка стратегии повышения уровня экологической безопасности.

Экспериментальное исследование по оценке улавливания растительным покровом взвешенных веществ проводилось в весенне-осенний период 2024 г. (май – сентябрь) в г. Москве. Образцы растений для изучения собирались на «зеленой» крыше административно-делового центра «Шереметьевская, 34». В период исследования наблюдался наиболее теплый весенне-осенний сезон за всю историю метеорологических наблюдений в г. Москве. Зафиксированы следующие метеорологические условия: в весенний период (май) — 88 мм осадков, средняя температура воздуха +16 °С, влажность 45–50 %, скорость ветра 5–6 м/с; в летний период (июнь – август) — 144,9 мм осадков, средняя температура воздуха +26 °С, влажность 66 %, скорость ветра 2–3 м/с; в осенний период (сентябрь) — 144,9 мм осадков, средняя температура воздуха +18 °С, влажность 62 %, скорость ветра 3–4 м/с.

Для исследования выбраны следующие виды растений: *Betula nana* (береза карликовая), *Cornus sericea* (свида шелковистая), *Cotoneaster dammeri* C.K. Schneid (кизильник Даммера), *Hemerocallis x hybrida Hort* (лилейник гибридный), *Rosa rugosa Thunb* (шиповник морщинистый), *Salix alba* L. (ива белая), *Sedum spectabile* (очиток видный) и *Spiraea japonica* (спирея японская).

Данные виды растений были отобраны из-за их признанного потенциала в области фиторемедиации и способности к адаптации к городской среде [14, 15]. Кроме того, их листья имеют разнообразную морфологию, которая оказывает влияние на улавливание ТМ, что представлено в табл. 1 [16].

Отбор проб проводился трижды в разные даты: в начале вегетационного периода в мае, во время пика вегетации в августе и в конце вегетационного периода в сентябре. Для каждого вида собирали по 20–30 зрелых листьев, которые помещали в бумажные конверты. Листья отбирали у здоровых растений, не имеющих признаков болезней или заражения вредителями, чтобы обеспечить целостность образцов. Собранные листья были полностью сформированными и одинакового возраста, что гарантировало однородность их зрелости на момент отбора проб.

Сбор с поверхности листьев твердых частиц (ТЧ) осуществлялся посредством систематической промывки листа с целью минимизации его повреждения. Каждый образец листа погружался в 200 мл

Табл. 1. Основные морфологические характеристики листьев различных видов растений

Table 1. Main morphological characteristics of leaves of various plant species

Вид растения Plant type	Шероховатость поверхности Surface roughness	Плотность трихом Density of trichomes	Плотность листа Sheet density
Береза карликовая Dwarf birch	Высокая High	Редкая Rare	Средняя Average
Свида шелковистая Svida silky	Низкая Low	Редкая Rare	Высокая High
Кизильник Даммера Dummer's Dogwood	Низкая Low	Отсутствует Absent	Высокая High
Лилейник гибридный Hybrid daylily	Низкая Low	Редкая Rare	Средняя Average
Шиповник морщинистый Rosehip wrinkly	Средняя Average	Плотная Dense	Средняя Average
Ива белая White willow	Низкая Low	Редкая Rare	Средняя Average
Очиток видный Sedum	Низкая Low	Отсутствует Absent	Высокая High
Спирея японская Japanese spiraea	Средняя Average	Редкая Rare	Высокая High

дистиллированной воды и осторожно перемешивался в течение 60 с. Этот процесс способствовал эффективному удалению ТЧ, не затрагивая нижележащие слои воска на поверхности листьев. Подготовленные образцы раствора затем фильтровались через металлическое сито в мензурки. Полученный промывочный раствор был подвергнут последовательной фильтрации с использованием вакуумной установки для фильтрования «Ручей-1». Для обеспечения точных измерений взвешенных веществ применялись различные виды фильтров согласно ГОСТ 12026–76. Исходя из размеров, твердые частицы разделили на три фракции: с диаметром 10–100; 2,5–10 и 0,2–2,5 мкм.

Сначала фильтры высушили в сушильном шкафу при 60 °С в течение 30 мин для удаления остаточной влаги. Этот этап необходим для обеспечения точности измерений. Затем фильтры в течение 60 мин до взвешивания находились в помещении для стабилизации температуры и влажности.

Для точного измерения количества ТЧ в восковом слое эпикуткулы листа использовали метод селективного растворения листа с применением хлороформа. Каждый образец листа промывали в 100 мл хлороформа в течение 45 с для растворения воскового слоя и удаления ТЧ. Полученный раствор, содержащий как растворенный воск, так и внедренные твердые частицы, фильтровали через взвешенный фильтр с последующей сушкой и взвешиванием.

После фильтрации раствор хлороформа переливали в заранее взвешенные стеклянные стаканы и помещали под вытяжной шкаф для полного испарения растворителя и удаления остаточных веществ. После испарения растворителя масса мерных колб была повторно измерена для определения общей массы воска и ТЧ, содержащихся в нем. Этот

метод точно определял количество воска независимо от осажденных ТЧ на поверхности листа.

С целью стандартизации данных о накоплении ТЧ и эпикуткулярной восковой массы требуется провести количественную оценку площади поверхности листьев. Это позволило выразить результаты в расчете на единицу площади и обеспечить сопоставимость между образцами и видами. Каждый образец листа размещался плоско на измерительном устройстве на достаточном расстоянии друг от друга, чтобы исключить контакт с соседними образцами. Каждый лист сфотографирован с высоким разрешением и обработан с помощью программного обеспечения WinFOLIA для расчета площади поверхности. Полученные сведения выражены в квадратных сантиметрах. Затем использована площадь поверхности для нормирования массы мелкодисперсных частиц и массы эпикуткулярного воска, чтобы обеспечить выражение этих значений в микрограммах на квадратный сантиметр для точных межвидовых сравнений.

Для определения содержания микроэлементов в листьях растений собранные образцы сушили на воздухе, далее измельчали в однородный порошок с помощью механической кофемолки для обеспечения однородности образца. Содержание микроэлементов в растительном материале измерялось портативным рентгенофлуоресцентным спектрометром «Метэксперт» от ГК «Южполиметалл-Холдинг» (г. Санкт-Петербург). Спектрометр откалиброван с использованием сертифицированных стандартных образцов и испускал два пучка излучения с интервалами 60 и 120 с. Концентрации химических веществ определялись в мг/кг.

Результаты исследования указывают на существенное изменение общего содержания тяжелых

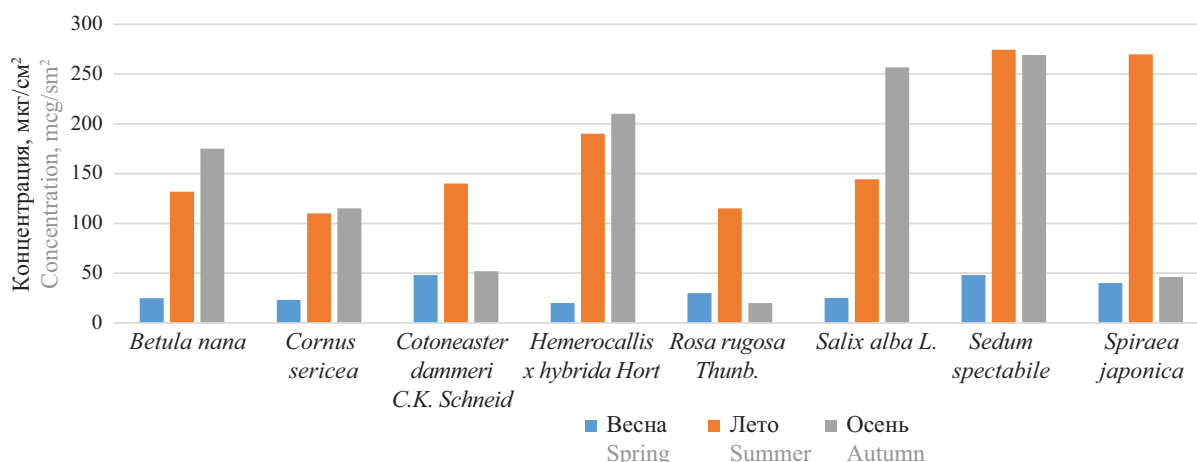


Рис. 1. Показатели общей концентрации твердых частиц, улавливаемых растениями в период исследования

Fig. 1. Indicators of the total concentration of particulate matter captured by plants during the study period

металлов и твердых частиц в различных видах растений и в разные времена года, причем наибольшее содержание ТЧ обычно наблюдается летом. Среди исследованных видов наибольшие значения удержания ТЧ были обнаружены у *S. spectabile* и *S. japonica* в летние месяцы, достигая 274,3 и 259,6 мкг/см² соответственно. Эти показатели значительно превышали уровни, зарегистрированные у видов с наименьшим накоплением, таких как *H. x hybrida* весной (15,1 мкг/см²).

Сезонные изменения в удержании ТМ также варьировались. Весной у различных видов растений обычно наблюдалось снижение концентрации ТМ по сравнению с летом. Например, весной у *Betula nana* концентрация составляла 24,8 мкг/см², в то время как летом она увеличилась до 131,7 мкг/см², что свидетельствует об увеличении удержания на 430 %. Подобные закономерности отмечались и у других видов, что, вероятно, свидетельствует о взаимосвязи между уровнем ТМ в атмосфере и активностью растений.

Вопреки этому, летом повышенная физиологическая активность и полностью развитая листовая поверхность, по всей видимости, значительно увеличивают захват тяжелых металлов, что приводит к максимальному их накоплению в течение этого сезона [17, 18]. На рис. 1 показано накопление $PM_{0,2-100}$ на листьях изучаемых видов растений.

В осенний период содержание ТЧ в атмосфере увеличивалось до уровня 30–50 мкг/м³ для PM_{10} из-за начала отопительного сезона [19]. Метеорологические условия, такие как понижение скорости ветра и температурные колебания, способствуют накоплению загрязнения. Например, вид *S. spectabile* сохраняет стабильный уровень ТЧ к концу вегетационного периода, с уровнем 269,1 мкг/см² осенью, что практически соответствует показателю летом (274,3 мкг/см²), это свидетельствует о 2%-ном снижении. В отличие от этого, у вида *S. alba* наблюдается значительное снижение содержания ТЧ осенью

(56,6 мкг/см²), что на 60 % меньше, чем летний пик (144,2 мкг/см²).

В данном исследовании обнаружены колебания в удержании твердых частиц различных размеров в определенных фракциях — от 10 до 100 мкм, от 2,5 до 10 мкм и от 0,2 до 2,5 мкм. Это свидетельствует о влиянии различных растений, биологических видов и сезонных условий на улавливание и удержание взвешенных частиц в воздухе (рис. 2).

В летний период вид *S. spectabile* показал самую высокую степень улавливания ТЧ среди всех изученных видов, достигая значений 130,2 и 122,4 мкг/см² во фракциях PM_{10-100} и $PM_{2,5-10}$ соответственно. Также высокую сохранность ТМ продемонстрировала *S. japonica* с накоплениями 124,5 мкг/см² в указанных фракциях. Особенно заметны были сезонные колебания в удержании ТМ, причем весной и осенью большинство видов показывали значительно более низкую способность улавливать тяжелые металлы по сравнению с летом.

В ходе исследования *B. nana* было обнаружено существенное увеличение содержания частиц PM_{10-100} (10,1 мкг/см²) в сравнении с весной, когда летом этот показатель достигал 61,5 мкг/см², что на 510 % выше. Это свидетельствует о влиянии сезонного роста на накопление ТЧ. Тем не менее некоторые виды, например *S. spectabile*, сохраняли высокие значения PM даже осенью. В отличие от этого, *R. rugosa* и *S. alba* демонстрировали существенное снижение содержания ТЧ осенью, особенно во фракциях PM_{10-100} и $PM_{0,2-2,5}$. Во всех видах и сезонах фракции PM_{10-100} и $PM_{2,5-10}$ показывали стабильно более высокие уровни удержания по сравнению с фракцией $PM_{0,2-2,5}$.

Исследования подчеркивают важность свойств поверхности листьев, таких как толщина воскового слоя и плотность трихом, для удержания определенных фракций тяжелых металлов. С другой стороны, наблюдается меньшая эффективность удержания фракций *R. rugosa* и *S. alba*, особенно в условиях

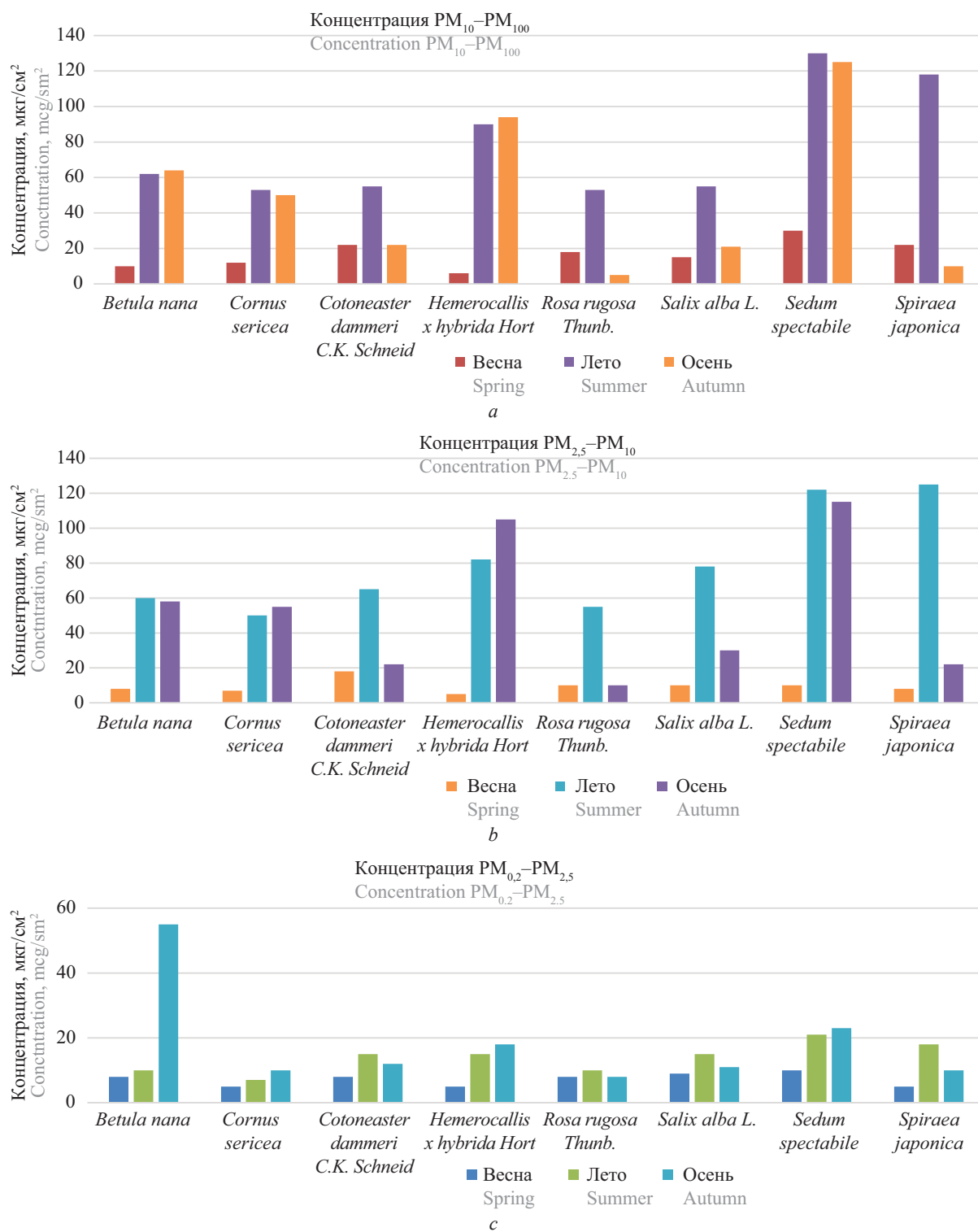


Рис. 2. Показатели концентрации $PM_{0.2}-PM_{100}$, улавливаемых растениями в период исследования

Fig. 2. Concentration of $PM_{0.2}-PM_{100}$ captured by plants during the study period

менее благоприятных сезонов, что может указывать на их ограниченную способность к долгосрочному улавливанию ТМ.

Анализ содержания воска показывает значительные различия между разными видами растений. В частности, у *B. nana* отмечается самый высокий уровень содержания воска, особенно весной,

когда он достигает 581,7 мкг/см², что представлено на рис. 3.

Несмотря на сезонное снижение, уровень содержания воска у *B. nana* остается на относительно высоком уровне в течение всего года, что свидетельствует о его хорошей способности удерживать твердые частицы.

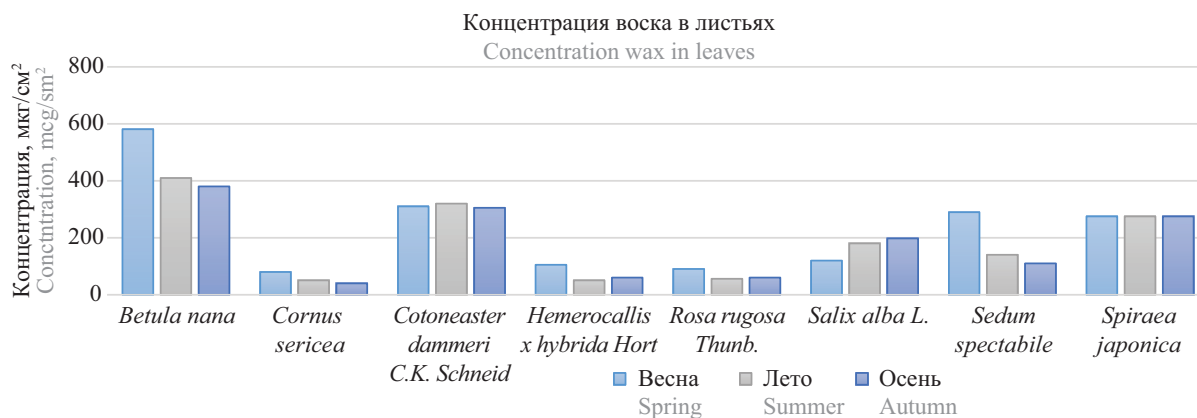


Рис. 3. Концентрация воска в листьях растений в период исследования

Fig. 3. Concentration of wax in plant leaves during the study period

Кроме того, высокое содержание воска также характерно для других видов растений, таких как *C. Dammeri* и *S. japonica*. У этих видов стабильно высокий уровень воска на протяжении всего сезона. В частности, у *S. japonica* наблюдается тенденция к увеличению содержания воска: осенью уровень воска вырос до 275,1 мкг/см², что на 26 % больше, чем ранее. Это может привести к улучшению способности удерживать ТЧ в дальнейшем.

В течение всего сезона *C. sericea* демонстрировала самое низкое содержание воска, достигнув максимального значения 79,5 мкг/см² весной и снизившись на 44 % до 44,8 мкг/см² к осени. *H. x hybrida* и *R. rugosa* также имели относительно низкое содержание воска, немного превышающее уровень *C. sericea*. Например, максимальное содержание

воска у *H. x hybrida* составляло 107,0 мкг/см² весной, с последующим снижением на примерно 47 % до 56,1 мкг/см² летом.

Анализ накопления микроэлементов у различных видов растений в разные сезоны выявил значительную изменчивость содержания марганца (Mn), железа (Fe), меди (Cu) и цинка (Zn). Эта изменчивость обусловлена видоспецифическими особенностями и сезонными условиями окружающей среды, оказывающими влияние на способность растений улавливать и накапливать указанные элементы. Например, накопление марганца различалось в зависимости от вида и времени года, что представлено в табл. 2. У вида *S. japonica* наблюдались стабильно высокие уровни марганца, особенно заметные весной и летом.

Табл. 2. Накопление в растениях различных химических элементов

Table 2. Accumulation of various chemical elements in plants

Виды растений Types of plants	Период исследования Study period	Химические элементы, мкг/г Chemical elements, mcg/g			
		Mn	Fe	Cu	Zn
Береза карликовая Dwarf birch	Весна Spring	58	375	20	473,1
	Лето Summer	99,3	342,7	18,3	721,7
	Осень Autumn	87	324,3	14,3	581,2
Свида шелковистая Svida silky	Весна Spring	65,2	184,7	15,3	34,7
	Лето Summer	43,3	167	16,7	56,3
	Осень Autumn	41,7	251	19,7	44,7
Кизильник Даммера Dummer's Dogwood	Весна Spring	45,3	255	17,7	62,7
	Лето Summer	40,2	215,7	12,3	48,5
	Осень Autumn	28,1	259,7	16,3	41,3

Виды растений Types of plants	Период исследования Study period	Химические элементы, мкг/г Chemical elements, mcg/g			
		Mn	Fe	Cu	Zn
Лилейник гибридный Hybrid daylily Лилейник гибридный Hybrid daylily	Весна Spring	60,4	466,7	24	54
	Лето Summer	63	433,7	40,5	63,7
	Осень Autumn	63	586	20	51,7
Шиповник морщинистый Rosehip wrinkly	Весна Spring	57,7	203,7	9,3	28,5
	Лето Summer	38,7	135	6,2	40,5
	Осень Autumn	51,3	264,3	7,5	25,7
Ива белая White willow Очиток видный Sedum	Весна Spring	58,7	746,3	24,7	56,3
	Лето Summer	54,7	596,7	23,1	54
	Осень Autumn	48,3	432	17,2	43,6
Ива белая White willow Очиток видный Sedum	Весна Spring	52	213	15,9	304,2
	Лето Summer	40,4	209,7	12,7	225,7
	Осень Autumn	29,3	196,3	10,1	122,3
Ива белая White willow	Весна Spring	84	237	22,3	66,7
	Лето Summer	84	245,7	21	57
	Осень Autumn	78,7	239,3	19,7	43,5

У *B. nana* обнаружено значительное накопление марганца, достигающее летом 99,3 мкг/г, затем снижающееся до 87,0 мкг/г осенью. У других видов, включая *S. spectabile*, отмечается заметное сезонное снижение содержания марганца: уровень у *S. spectabile* уменьшился с 52,0 мкг/г весной до 29,3 мкг/г осенью, что свидетельствует о снижении его концентрации в течение сезона.

S. alba демонстрирует наивысшие уровни содержания железа, достигая пика весной (746,3 мкг/г) и постепенно снижаясь до 432,0 мкг/г осенью.

H. x hybrida демонстрировала значительное накопление железа, особенно заметное осенью, когда его содержание достигало 586,0 мкг/г. Это свидетельствует о повышенном уровне железа в организме в более поздние сезоны. В отличие от этого, у *R. rugosa* содержание железа оставалось стабильно ниже, с самым высоким значением 264,3 мкг/г осенью. Это относительно низкий показатель по сравнению с другими видами, указывающий на ограниченную способность к накоплению железа.

Содержание меди у всех видов, как правило, было ниже, чем марганца и железа, но все же наблюдались заметные сезонные тенденции.

H. x hybrida продемонстрировала самые высокие уровни меди, особенно летом (40,5 мкг/г), что свидетельствует о пиковом содержании меди в этот сезон. Другие виды, такие как *B. pendula* и *C. dammeri*, показали более стабильные уровни меди в течение сезонов. Например, содержание меди у *B. nana* составляло около 20 мкг/г весной и 14,3 мкг/г осенью. У *R. rugosa* наблюдались самые низкие уровни содержания меди, достигая максимума весной на уровне 9,3 мкг/г и снижаясь до 7,5 мкг/г осенью, что указывает на минимальные сезонные колебания в накоплении меди.

Уровни цинка в различных видах растений различались как между видами, так и в зависимости от сезона. Например, *B. nana* и *S. spectabile* выделялись высокой концентрацией цинка. У *B. nana* максимальное содержание цинка достигало 721,7 мкг/г летом, в то время как у *S. spectabile* пиковое значение было зарегистрировано весной (304,2 мкг/г),

а затем уменьшилось до 122,3 мкг/г осенью, что составляет примерно 60 % от максимального уровня. Наоборот, уровни цинка у другого вида, такого как *C. sericea*, оставались стабильно низкими в течение всего сезона, достигая лишь 56,3 мкг/г летом.

Исследование показывает различия между видами растений на «зеленой» крыше в удержании ТЧ и влияние загрязнения воздуха на способность растений удерживать ТМ. Растения *S. spectabile* и *S. japonica* имеют высокую способность удерживать металлы и могут использоваться на крышах для снижения загрязнения воздуха в городах.

Плотная листва растений *S. spectabile* и *S. japonica* играет ключевую роль в их эффективности захвата твердых частиц благодаря увеличению поверхности и удерживающей способности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование подтверждает важность выбора растений с особыми структурными особенностями для зеленой городской инфраструктуры. Высокие уровни ТМ на «зеленых» крышах, обнаруженные летом, связаны с условиями окружающей среды и активностью промышленности.

Сезонные факторы влияют на содержание ТЧ в растениях. Осадки весной смывают частицы с листьев, летом садоводческие работы улавливают и повышают уровень ТЧ. Осенью старение листьев уменьшает доступную поверхность. Некоторые растения демонстрируют пиковое содержание ТЧ летом из-за структурных адаптаций.

Факторы окружающей среды, такие как осадки и ветер, влияют на растения. Ряд растений не соответствовали ожидаемым закономерностям из-за их видоспецифических особенностей. Внутренние особенности растений могут быть важнее внешних факторов, таких как осадки или садоводческая деятельность.

Исследование подчеркивает важность изучения удержания тяжелых металлов частицами разного размера. Крупные частицы склонны скапливаться на листьях из-за гравитационного осаждения, в то время как мелкие частицы задерживаются в воздухе дольше и оседают позже.

Редкое выпадение осадков уменьшает накопление веществ и влияет на выбор растений для очистки воздуха в городах. Морфология листьев важна для удержания загрязнений.

Результаты демонстрируют, что текстура растений важна для увеличения улавливания частиц PM_{10-100} и $PM_{2,5-10}$. Микроструктура поверхности растений способствует прилипанию частиц и повышает эффективность улавливания ТЧ.

Актуальность взаимосвязи между фенологией растений и удержанием ТЧ в атмосфере подчеркивается сезонными изменениями [20]. Растения вегетационного периода претерпевают изменения, способствующие задержке частиц, что подтверждено

исследованием на примере *B. nana* с увеличением накопления PM_{10-100} на 510 % с весны до лета.

Результаты показывают, что сезонная динамика роста важна для эффективной фиторемедиации. Некоторые растения теряют способность задерживать ТМ осенью из-за уменьшения листовой площади, снижения активности и старения. Однако некоторые виды, например *S. spectabile*, остаются эффективными до осени.

Растения устойчивы к загрязнениям благодаря своей активности и адаптивности. Большая роль в поддержании городской растительности отводится вечнозеленым видам. Размер частиц и время влияют на удержание загрязнений.

Озеленение крыш требует тщательного подбора растений для очистки воздуха в городских условиях. Внедрение растений, сохраняющих свои свойства круглый год, повысит эффективность городской зеленой инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование выявило, что «зеленые» крыши могут способствовать улучшению качества городского воздуха за счет удержания ТМ на поверхности растений. Проведенный анализ удержания ТМ и токсичных веществ в восьми видах растений подчеркнул важную роль видоспецифических характеристик, таких как насыщенная воском поверхность и густая листва, в поглощении загрязняющих веществ. Особенно выделяются виды *S. spectabile* и *S. japonica*, которые проявили исключительную способность удерживать ТМ, делая их идеальными кандидатами для использования на «зеленых» крышах.

Выбор растений для озеленения крыш является ключевым моментом. Следует помнить, что сезонные изменения в удержании тепла и влаги на крыше зависят не только от адаптивных свойств растений, но также от внешних факторов, включая осадки, садоводческую деятельность и опадение листьев. Отклонения, выявленные у растений, таких как *Betula nana* и *Sedum spectabile*, подчеркивают необходимость дальнейших исследований специфической адаптации растений, способствующих устойчивому удержанию тепла и влаги на крыше вне зависимости от сезонных проблем. «Зеленые» крыши, засаженные как вечнозелеными, так и лиственными растениями, могут быть эффективным решением для улучшения микроклимата и экологии городской среды.

Растения на «зеленых» крышах могут смягчить сезонные изменения, обеспечивая постоянное снижение уровня загрязняющих веществ в городах. Растения, покрытые воском, способны задерживать мелкие частицы, что усиливает их способность очищать воздух от загрязнений. «Зеленые» крыши выполняют не только функцию улучшения качества воздуха, но также помогают сокращать «острова тепла» в городах, регулируют стоки воды во время

дождей и представляют собой многофункциональные системы.

Для поддержания биоразнообразия требуется провести дальнейшие исследования, направленные на изучение долгосрочного воздействия разных видов растений в различных условиях окружающей среды. Особое внимание следует уделить оптимизации сочетаний видов для достижения максимальной эффективности. Расширение использования «зеленых» крыш с подбором подходящих растений может способствовать улучшению окружающей среды и здоровья населения, подчеркивая их важность как неотъемлемой части системы экологической безопасности городских территорий.

ции сочетаний видов для достижения максимальной эффективности. Расширение использования «зеленых» крыш с подбором подходящих растений может способствовать улучшению окружающей среды и здоровья населения, подчеркивая их важность как неотъемлемой части системы экологической безопасности городских территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оводков М.В., Манжилевская С.Е., Бурлаченко А.О., Азаров В.Н. Учет загрязнения воздуха от точечного строительства в сводных расчетах загрязнения атмосферного воздуха // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. № 3 (96). С. 166–174. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_166. EDN URXHKV.

2. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H.J.S., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter // Building and Environment. 2021. Vol. 204. P. 108120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120. EDN NDXWSC.

3. Hrechko A.A. Experience and benefits of using green roofs as an element in green infrastructure // Вісник Харківського Національного Університету ім. В.Н. Каразіна. Серія: Екологія. 2022. No. 26. Pp. 32–42. DOI: 10.26565/1992-4259-2022-26-03. EDN XRFPWQ.

4. Фролов А.М., Елисеєва Д.Ю., Симонов В.Л. Исследование проблемы загрязнения атмосферы и разработка системы мониторинга атмосферного воздуха // Аллея науки. 2019. Т. 1. № 4 (31). С. 890–901. EDN OAOOBY.

5. Осетрина Д.А., Савельева Ю.К. Применение технологий зеленых крыш в архитектуре // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. № 8. С. 1053–1058. EDN PADPJP.

6. Михайлова Л.А., Томских Э.С., Лана С.Э., Бурлака Н.М., Смолянинова М.А. Анализ уровня загрязнения атмосферного воздуха городской среды (на примере г. Чита) // Вестник Авиценны. 2020. Т. 22. № 2. С. 228–236. DOI: 10.25005/2074-0581-2020-22-2-228-236. EDN XQPJSM.

7. Meredova G., Atayeva B., Chosurova J., Anageldiveva M. Ecology and architecture: a symbiotic relationship // Innovation Science. 2024. No. 9–1. Pp. 133–135. EDN CGSQDU.

8. Abdalla E.M.H., Alfredsen K., Muthanna T.M. On the use of multi-objective optimization for multi-site calibration of extensive green roofs // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 326. P. 116716. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116716. EDN ZRGSFA.

9. Любин Е.Д. Зеленая архитектура в условиях плотной застройки: анализ подходов в Москве и ев-

ропейских городах // World science: problems and innovations : сб. ст. LXXXIII Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 304–309. EDN HTAKKU.

10. Тимофеева С.С., Ульрих Д.В., Тимофеев С.С. Возможности использования фиторемедиционного потенциала и сорбционно-габионных модулей в ревитализации техногенно-нарушенных территорий Южного Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № S6. С. 17–41. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-17-41. EDN SBRWKB.

11. Ташикова А.Ж., Торопов А.С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 114–124. EDN YTAOEX.

12. Новикова С.А., Кочуров Б.И. Геоэкологическая оценка влияния метеорологических условий на загрязнение воздуха Иркутска // Экология урбанизированных территорий. 2023. № 3. С. 34–41. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-3-34-41. EDN FBHOJL.

13. Navari-Izzo F., Quartacci M.C. Phytoremediation of metals // Minerva Siotech. 2001. Vol. 13. Pp. 73–83.

14. Зайкова Е.Ю., Феофанова С.С. Фиторемедиационный потенциал озелененных территорий в городе // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 5. С. 685–712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.685-712. EDN CDNGFF.

15. Malizia D., Giuliano A., Ortaggi G., Masotti A. Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil // Chemistry Central Journal. 2012. Vol. 6. Issue S2. DOI: 10.1186/1752-153X-6-S2-S6

16. Князева Е.И. Газоустойчивость растений в связи с их систематическим положением и морфолого-анатомическими особенностями // Дымоустойчивость растений и дымоустойчивые ассортименты. М., 1950. 321 с.

17. Олива Т.В., Колесниченко Е.Ю., Панин С.И., Манохина Л.А. Аккумуляция тяжелых металлов древесными породами и сельскохозяйственными культурами в условиях примагистральной экосистемы // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 184–193. DOI: 10.17513/use.37757. EDN QDNBMQ.

18. Сотников И.Л., Петренко А.П. Древесные породы как биоиндикаторы загрязненности чернозема оподзоленного Липецкой области свинцом // Агропромышленные технологии Центральной России. 2025. № 2 (36). С. 151–157. DOI: 10.24888/2541-7835-2025-36-2-151-157. EDN JFANRC.

19. Крюкова С.В., Симакина Т.Е. Оценка влияния метеорологических параметров на концентрации загрязняющих веществ в атмосфере Санкт-

Петербурга // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 5–2. С. 299–305. EDN TVPEAF.

20. Серова Л.А., Петрова Н.А., Куликова Л.В., Шакина Т.Н., Лоскутова Е.А. Фенологические наблюдения в Учебно-научном центре «Ботанический сад» СГУ (фиксация наблюдений и обработка результатов) // Hortus Botanicus. 2021. Vol. 16. Pp. 282–289. DOI: 10.15393/j4.art.2021.7765. EDN DXRUJV.

Поступила в редакцию 29 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 12 ноября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Валерий Николаевич Азаров — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Институт архитектуры и строительства; Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; azarovpubl@mail.ru;

Елена Владимировна Сысоева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SysoevaEV@mgsu.ru;

Дена Карим-Султанович Батаев — доктор технических наук, профессор, директор, академик Академии наук Чеченской Республики; Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН); 364020, г. Грозный, ул. Вахи Алиева, д. 21а; kniiran@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ovodkov M.V., Manzhilevskaya S.E., Burlachenko A.O., Azarov V.N. Inclusion of data on air pollution by dust particles from spot construction in summary calculations of atmospheric air pollution. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. The Construction and Architecture*. 2024; 3(96):166-174. DOI: 10.35211/18154360_2024_3_166. EDN URXHKV. (rus.).

2. Viecco M., Jorquera H., Sharma A., Bustamante W., Fernando H.J.S., Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment*. 2021; 204:108120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108120. EDN NDXWSC.

3. Hrechko A.A. Experience and benefits of using green roofs as an element in green infrastructure. *Bulletin of the Kharkiv National University V.N. Karazin. Series: Ecology*. 2022; 26:32-42. DOI: 10.26565/1992-4259-2022-26-03. EDN XRFPWQ.

4. Frolov A.M., Eliseeva D.Yu., Simonov V.L. Research on the Problem of Atmospheric Pollution and Development of an Atmospheric Air Monitoring System. *Alley of Science*. 2019; 1(4):(31):890-901. EDN OAOOBY. (rus.).

5. Osetrina D.A., Savelyeva Yu.K. Application of Green Roof Technologies in Architecture. *Issues of Sustainable Development of Society*. 2022; 8:1053-1058. EDN PADPJP. (rus.).

6. Mikhaylova L.A., Tomskikh E.S., Lapa S.E., Burlaka N.M., Smolyaninova M.A. Analysis of the level of atmospheric air pollution of urban environment (on the example of Chita city). *Avicenna Bulletin*. 2020; 22(2):228-236. DOI: 10.25005/2074-0581-2020-22-2-228-236. EDN XQPJSM. (rus.).

7. Meredova G., Atayeva B., Chosurova J., Annageldiveva M. Ecology and architecture: a symbiotic relationship. *Innovation Science*. 2024; 9-1:133-135. EDN CGSQDU.

8. Abdalla E.M.H., Alfredsen K., Muthanna T.M. On the use of multi-objective optimization for multi-site calibration of extensive green roofs. *Journal of Environmental Management*. 2023; 326:116716. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116716. EDN ZRGSFA.

9. Lyubin E.D. Green architecture in the conditions of dense building: analysis of approaches in Russia and European countries. *World science: problems and innovations : collection of articles of the LXXXIII International Scientific and Practical Conference*. 2025; 304-309. EDN HTAKKU. (rus.).

10. Timofeeva S.S., Ulrikh D.V., Timofeev S.S. Possibilities of using phytoremediation potential and sorption-gabion modules in the revitalization of technogenic-disturbed territories of the southern Urals. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2020; S6:17-41. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-17-41. EDN SBRWKB. (rus.).
11. Tashekova A.Zh., Toropov A.S. Using plant leaves as biogeochemical indicators of urban environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017; 328(5):114-124. EDN YTAOEX. (rus.).
12. Novikova S.A., Kochurov B.I. Geocological assessment of the impact of meteorological conditions on air pollution in Irkutsk. *Ecology of Urban Areas*. 2023; 3:34-41. DOI: 10.24412/1816-1863-2023-3-34-41. EDN FBHOJL. (rus.).
13. Navari-Izzo F., Quartacci M.C. Phytoremediation of metals. *Minerva Siotech*. 2001; 13:73-83.
14. Zaykova E.Yu., Feofanova S.S. Phytoremediation potential of green spaces in the city. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(5):685-712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.685-712. EDN CDNGFF. (rus.).
15. Malizia D., Giuliano A., Ortaggi G., Masotti A. Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chemistry Central Journal*. 2012; 6(S2). DOI: 10.1186/1752-153X-6-S2-S6
16. Knyazeva E.I. Gas resistance of plants in relation to their systematic position and morphological and anatomical features. *Smoke Resistance of Plants and Smoke-Resistant Assortments*. Moscow, 1950; 321. (rus.).
17. Oliva T.V., Kolesnichenko E.Yu., Panin S.I., Manokhina L.A. Heavy metals accumulation by wood species and agricultural plant in conditions of roadside ecosystem. *Advances in Current Natural Sciences*. 2021; 12:184-193. DOI: 10.17513/use.37757. EDN QDNBMQ. (rus.).
18. Sotnikov I.L., Petrenko A.P. Tree species as bioindicators of lead contamination of lead-depleted chernozem in the Lipetsk region. *Agro-industrial Technologies of Central Russia*. 2025; 2(36):151-157. DOI: 10.24888/2541-7835-2025-36-2-151-157. EDN JFANRC. (rus.).
19. Kryukova S.V., Simakina T.E. Assessment of the Influence of Meteorological Parameters on the Concentrations of Pollutants in the Atmosphere of Saint Petersburg. *Actual Problems of the Humanities and Natural Sciences*. 2015; 5-2:299-305. EDN TVPEAF. (rus.).
20. Serova L.A., Petrova N.A., Kulikova L.V., Shakina T.N., Loskutova E.A. Phenological observations at the SSU botanical garden education and research center (recording of observations and processing of results). *Hortus Botanicus*. 2021; 16:282-289. DOI: 10.15393/j4.art.2021.7765. EDN DXRUJV. (rus.).

Received September 29, 2025.

Adopted in revised form on October 8, 2025.

Approved for publication on November 12, 2025.

BIONOTES: **Valery N. Azarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety in Construction and Urban Management, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; azarovpubl@mail.ru;

Elena V. Sysoeva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SysoevaEV@mgsu.ru;

Dena K.-S. Bataev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Academician of the Academy of Sciences of the Chechen Republic; **Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences (CI RAS)**; 21a Vahi Aliyev st., Grozny, 364020, Russian Federation; kniiran@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

The authors declare no conflict of interest.