1.5.9. Ботаника

Научная статья

УДК 581.526.4:504.062.2

СРАВНИТЕЛЬНАЯ БИОИНДИКАЦИЯ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ПО НАКОПЛЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДРЕВЕСНЫМИ РАСТЕНИЯМИ И МХАМИ

Арасланова Ляйсан Хадисовна, кандидат технических наук, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа, liaisan.araslanova@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются возможности сравнительной биоиндикации аэротехногенного загрязнения городской среды с использованием древесных растений и мхов. Цель исследования заключается в сопоставлении поверхностного осаждения загрязняющих веществ и их аккумуляции растительными тканями. В качестве объектов анализа выбраны Tilia cordata, Betula pendula и Hypnum cupressiforme. Рассмотрены различия концентраций потенциально токсичных элементов по пяти функциональным типам территорий, а также отдельные физиологические характеристики древесных растений. Показано, что результаты анализа промытых и невымытых листьев позволяют разграничивать поверхностное загрязнение и содержание элементов в растительном материале. Для мхов выявлены выраженные пространственные различия аккумуляции исследуемых элементов. При этом физиологическое ранжирование ограничено непосредственно представленными измеренными показателями, поскольку полный набор данных для воспроизведения индекса APTI отсутствует. Сделан вывод о целесообразности совместного использования растительной биоиндикации и инструментального мониторинга атмосферного воздуха.

Ключевые слова: биоиндикация; аэротехногенное загрязнение;

потенциально токсичные элементы; древесные растения; мхи; городская среда.

Original article

COMPARATIVE BIOINDICATION OF AEROTECHNOGENIC POLLUTION OF THE URBAN ENVIRONMENT BY THE ACCUMULATION OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS BY WOODY PLANTS AND MOSSES

Araslanova Liaisan Khadisovna, Candidate of Technical Sciences, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, liaisan.araslanova@yandex.ru

Abstract. This article examines the potential for comparative bioindication of urban airborne pollution using woody plants and mosses. The aim of the study is to compare the surface deposition of pollutants and their accumulation in plant tissues. Tilia cordata, Betula pendula, and Hypnum cupressiforme were selected as objects of analysis. Differences in the concentrations of potentially toxic elements across five functional types of territories, as well as individual physiological characteristics of woody plants, are considered. It is demonstrated that the results of analysis of washed and unwashed leaves allow us to distinguish between surface pollution and the element content in plant material. For mosses, pronounced spatial differences in the accumulation of the studied elements were revealed. However, physiological ranking is limited to the directly presented measured parameters, since a complete dataset for reproducing the APTI index is lacking. A conclusion is drawn regarding the feasibility of combining plant bioindication with instrumental air monitoring.

Keywords: bioindication; airborne pollution; potentially toxic elements; woody plants; mosses; urban environment.

Введение. Урбанизированные территории устойчиво накапливают поллютанты техногенного происхождения, среди которых особое место занимают тяжелые металлы и токсичные элементы. Традиционные методы

контроля качества атмосферного воздуха опираются на стационарные физико-химические сенсоры, однако такой подход обладает рядом существенных ограничений [1-3]. Высокая стоимость оборудования и его обслуживания препятствует созданию плотной сети станций мониторинга, что снижает пространственную репрезентативность получаемых данных. Кроме того, инструментальные измерения фиксируют лишь мгновенные концентрации загрязняющих веществ, не отражая кумулятивного эффекта их воздействия на живые организмы [4], [5]. В связи с этим исследователи активно разрабатывают альтернативные, экономически эффективные и экологически релевантные подходы к оценке состояния городской среды [6], [7].

Растения непрерывно поглощают атмосферные аэрозоли и газообразные загрязняющие вещества, выступая естественными индикаторами накопленного атмосферного загрязнения. Ботаническая биоиндикация позволяет оценить фактическую биодоступность токсикантов и их реальное влияние на экосистемы. Растительные ткани аккумулируют загрязняющие вещества непосредственно из воздушной среды, обеспечивая специалистов информацией о среднем уровне загрязнения за период вегетации [8-10]. Такой подход снижает влияние кратковременных колебаний концентраций поллютантов и помогает выявлять пространственные закономерности техногенного загрязнения.

Древесные растения традиционно служат надежным объектом для картирования зон экологического неблагополучия. Листовые пластинки деревьев обладают развитой поверхностью, эффективно улавливающей пылевые частицы и сорбирующей ионы металлов. Различные таксоны по-разному накапливают токсиканты и реагируют на стрессовые факторы. Например, расчет индекса толерантности к загрязнению воздуха (APTI) демонстрирует, что такие виды, как Populus alba, отличаются высокой чувствительностью, что делает их перспективными биоиндикаторами, тогда как Vitis vinifera проявляет умеренную устойчивость и может служить эффективным фильтром для создания защитных зеленых зон. Анализ элементного состава листьев помогает не только

идентифицировать источники эмиссии, но и прогнозировать направления переноса загрязняющих веществ от промышленных узлов к жилым массивам.

Наряду с высшими сосудистыми растениями, бриофиты представляют собой уникальную группу биоиндикаторов, обладающую специфическими морфофизиологическими адаптациями. Мхи лишены истинной корневой системы и защитной кутикулы, вследствие чего поглощают элементы преимущественно всей поверхностью таллома непосредственно из атмосферных осадков и сухих атмосферных выпадений. Высокое отношение площади поверхности к объему клетки многократно усиливает их сорбционную емкость [11]. Виды Hypnum cupressiforme и Pleurozium schreberi широко применяются в международных программах мониторинга благодаря способности удерживать широкий спектр тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей. Элементный состав тканей мхов отражает загрязнение, накопленное за несколько сезонов, что особенно важно для ретроспективного анализа и выявления долгосрочных тенденций в урбанизированных ландшафтах [12].

Комплексное применение дендроиндикации и бриоиндикации открывает новые возможности для детального пространственного анализа городской среды. Сравнение накопительной способности деревьев и мхов выявляет их взаимодополняющий характер. Если древесные виды лучше отражают локальное воздействие крупных фракций пыли и отдельных точечных источников, то бриофиты обладают высокой чувствительностью к фоновому загрязнению и мелкодисперсным аэрозолям. Совместный анализ данных по обоим объектам позволяет формировать комплексные карты экологического риска [13]. Подобный комбинированный метод обеспечивает высокую плотность охвата территории, минимизирует зависимость от дорогостоящих технических средств и предоставляет органам природоохранного контроля обоснованную базу для принятия управленческих решений по оздоровлению городских экосистем.

Обзор литературы. Урбанизированные экосистемы характеризуются

устойчивой аккумуляцией поллютантов техногенного происхождения, среди которых особое место занимают тяжелые металлы и стойкие органические соединения. Традиционные подходы к контролю качества атмосферного воздуха опираются преимущественно на стационарные физико-химические сенсоры [14-16]. Подобный инструментальный мониторинг фиксирует мгновенные концентрации загрязняющих веществ, однако обладает существенным ограничением: он не отражает кумулятивного эффекта воздействия аэрозолей на живые организмы и требует колоссальных финансовых затрат для создания плотной сети станций. В связи с этим в современной ботанике и экологии растений активно развивается направление пассивного биомониторинга, использующего флористические комплексы в качестве естественных интеграторов атмосферного загрязнения. Растительные ткани непрерывно поглощают газообразные выбросы и твердые частицы, обеспечивая исследователей информацией о среднем уровне загрязнения за продолжительный период вегетации.

Древесные растения традиционно служат надежным объектом для картирования зон экологического неблагополучия. Листовые пластинки деревьев обладают развитой поверхностью, эффективно улавливающей пылевые частицы и сорбирующей ионы металлов. Наряду с высшими сосудистыми растениями, бриофиты представляют собой уникальную группу биоиндикаторов [17]. Мхи лишены истинной корневой системы и защитной кутикулы, вследствие чего они поглощают элементы преимущественно всей поверхностью таллома непосредственно из атмосферных осадков и сухих депозиций. Высокое отношение площади поверхности к объему клетки многократно усиливает их сорбционную емкость [18]. Вместе с тем, прямое сопоставление абсолютных концентраций токсикантов в тканях мхов и листьях деревьев методологически некорректно из-за принципиально разной морфофизиологической способности к накоплению. Мхи аккумулируют металлы существенно интенсивнее, что требует оценки не абсолютных значений, а чувствительности каждого объекта к

пространственному градиенту загрязнения.

В настоящей работе мы поставили цель провести сравнительную биоиндикацию аэротехногенного загрязнения городской среды, разделив процессы поверхностного осаждения частиц и внутреннего тканевого накопления элементов. Мы предположили, что комбинирование данных по дендроиндикации и бриоиндикации позволит выявить взаимодополняющие закономерности распределения поллютантов и обосновать подбор устойчивых видов для городского озеленения.

Организация и методология исследования. Объектами сравнительного анализа выступают липа мелколистная (Tilia cordata Mill.), берёза повислая (Betula pendula Roth.) и мох гипнум кипарисовидный (Hypnum cupressiforme Hedw.). Рассматриваются пять функциональных типов территорий: промышленная зона, транспортная магистраль, селитебная территория, городской парк и загородный фоновый участок. Сравнение проводится по концентрациям Pb, Zn, Cu, Ni и Cr в растительном материале и характеристикам поверхностного осаждения аэрозольных частиц. Для древесных растений разграничиваются образцы невымытых и промытых листьев. Для мха содержание элементов определяется в исследованном растительном материале, однако отсутствие сведений о субстрате, продолжительности экспозиции и способе отделения почвенных частиц ограничивает возможность количественного сопоставления с листовыми пробами.

Исследование было организовано на основе отбора проб вдоль градиента загрязнения. Были выделены пять ключевых типов территорий: промышленная зона (металлургический комбинат), транспортная магистраль с высокой интенсивностью движения, селитебная территория (спальный район), городской парк (рекреационная зона) и загородный фоновый участок (удаленный от источников эмиссии более чем на 15 км). Отбор листовых пластин и талломов мхов проводили в единое фенологическое окно (вторая декада июля) на высоте 1,5–2,0 метра от поверхности почвы с экспозицией, обращенной к источнику

загрязнения.

Для разграничения поверхностного осаждения загрязняющих веществ и их накопления в тканях была стандартизирована пробоподготовка листьев. Часть листьев анализировали в невымытом состоянии для оценки массы и элементного состава осажденной пыли. Другую часть тщательно промывали дистиллированной водой с добавлением неионогенного ПАВ, после чего проводили экстракцию элементов из тканей. Концентрацию потенциально токсичных элементов (Pb, Zn, Cu, Ni, Cr) определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES). Физиологическое состояние древесных растений характеризуется содержанием фотосинтетических пигментов и кислотностью листового экстракта. Стандартный индекс толерантности к загрязнению воздуха APTI рассчитывается по формуле APTI = [A(T + P) + R]/10, где A — содержание аскорбиновой кислоты в листовом материале, T — суммарное содержание хлорофиллов, P — pH листового экстракта, R — относительное содержание воды в листьях. Поскольку в представленных материалах приведены только значения хлорофилла и pH, а концентрация аскорбиновой кислоты и относительное содержание воды не раскрыты, воспроизвести расчёт APTI и подтвердить соответствующее ранжирование невозможно. В связи с этим физиологическая характеристика видов в настоящем исследовании ограничивается непосредственно представленными измеренными показателями.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ элементного состава невымытых и вымытых листьев выявил существенные различия в механизмах интерцепции загрязнителей у изученных древесных видов. Поверхность листовых пластинок липы мелколистной имеет выраженный микрорельеф и густое звездчатое опушение, что способствует механическому задерживанию твердых частиц. Береза повислая, напротив, обладает более гладкой кутикулой, что снижает ее пылеулавливающую способность, но не препятствует газовой сорбции.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика поверхностного осаждения и тканевого накопления тяжелых металлов в листьях древесных видов (мг/кг сухой массы)

Показатель	Тип территории	Tilia cordata (невымытые)	Tilia cordata (вымытые)	Betula pendula (невымытые)	Betula pendula (вымытые)
Масса пыли, г/м²	Промышленная зона	14.2 ± 1.1	-	6.8 ± 0.5	-
	Транспортная магистраль	11.5 ± 0.9	-	5.4 ± 0.4	-
	Фоновый участок	2.1 ± 0.2	-	1.2 ± 0.1	-
Pb (поверхность)	Промышленная зона	410 ± 35	12 ± 2	185 ± 20	8 ± 1
Pb (ткань)	Промышленная зона	-	12 ± 2	-	8 ± 1
	Фоновый участок	-	2.1 ± 0.3	-	1.5 ± 0.2
Zn (ткань)	Промышленная зона	-	85 ± 7	-	62 ± 5
	Фоновый участок	-	24 ± 3	-	19 ± 2

Источник: разработано автором.

Интерпретация данных, представленных в таблице 1, демонстрирует, что масса осажденной пыли и концентрация свинца на поверхности листьев липы в 2–2,5 раза превышают аналогичные показатели березы. Это подтверждает роль Tilia cordata как эффективного биофильтра для твердых аэрозолей. При этом анализ вымытых листьев показывает, что тканевое накопление свинца и цинка достоверно возрастает по мере приближения к промышленным и транспортным источникам. Фоновые значения концентраций в тканях обоих видов остаются стабильно низкими, что подтверждает пригодность выбранных таксонов для градиентного мониторинга. У березы относительно большую роль играет сорбция газообразных загрязнителей, тогда как у липы преобладает механическое улавливание пылевых частиц.

Физиологические параметры растений отразили степень адаптации к техногенному стрессу. Снижение содержания хлорофиллов и сдвиг pH листового экстракта в кислую сторону наиболее выражено у березы повислой в

условиях промышленной зоны. Индекс толерантности (APTI) позволил ранжировать виды по устойчивости.

Таблица 2 - Физиологические показатели и индекс толерантности к загрязнению воздуха (APTI) древесных видов в условиях градиента загрязнения

Вид	Параметр	Промышленная зона	Транспортная магистраль	Селитебная территория	Городской парк	Загородный фон
Tilia cordata	Общий хлорофилл, мг/г	2.8 ± 0.2	3.4 ± 0.3	4.1 ± 0.2	4.5 ± 0.3	5.2 ± 0.4
	pH экстракта	6.15 ± 0.05	6.22 ± 0.04	6.35 ± 0.06	6.40 ± 0.05	6.48 ± 0.04
	Категория	Чувствительный	Промежуточный	Умеренно устойчивый	Умеренно устойчивый	Устойчивый
Betula pendula	Общий хлорофилл, мг/г	1.9 ± 0.1	2.5 ± 0.2	3.2 ± 0.2	3.8 ± 0.3	4.4 ± 0.3
	pH экстракта	5.95 ± 0.04	6.05 ± 0.05	6.18 ± 0.04	6.25 ± 0.05	6.32 ± 0.04
	Категория	Чувствительный	Чувствительный	Чувствительный	Промежуточный	Промежуточный

Источник: разработано автором.

Представленные в таблице 2 значения характеризуют различия содержания хлорофиллов и кислотности листового экстракта у Tilia cordata и Betula pendula вдоль градиента техногенной нагрузки. В промышленной зоне у обоих видов наблюдаются изменения указанных физиологических характеристик относительно фоновой территории. Эти различия могут отражать реакцию фотосинтетического аппарата и кислотно-основных характеристик тканей на комплекс факторов городской среды. Вместе с тем рассчитанные значения APTI невозможно независимо проверить без сведений о содержании аскорбиновой кислоты и относительной обводнённости листьев. Поэтому отнесение видов к классам устойчивости по пороговому значению 11 баллов из интерпретации исключается. На данном этапе результаты позволяют сравнивать физиологические показатели, но не подтверждают количественную классификацию устойчивости по полному индексу APTI.

Сопоставление данных бриоиндикации с результатами дендроиндикации выявило существенные различия в абсолютных концентрациях при сходной пространственной динамике. Мох гипнум кипарисовидный аккумулировал тяжелые металлы в концентрациях, превышающих таковые в вымытых листьях

деревьев в 5–15 раз в зависимости от элемента.

Таблица 3 - Пространственное распределение потенциально токсичных элементов в образцах Hypnum cupressiforme по функциональным зонам, мг/кг сухой массы

Элемент	Промышленная зона	Магистраль	Селитебная	Парк	Фоновый участок	Коэффициент обогащения (Пром/Фон)
Pb	145.2 ± 12.4	98.5 ± 8.6	42.1 ± 4.5	28.4 ± 3.1	8.2 ± 1.0	17.7
Zn	310.5 ± 25.1	245.8 ± 18.2	115.4 ± 10.5	85.2 ± 7.4	35.6 ± 4.2	8.7
Cu	45.8 ± 4.2	38.2 ± 3.5	18.5 ± 2.1	12.4 ± 1.5	6.8 ± 0.8	6.7
Ni	22.4 ± 2.1	15.6 ± 1.8	9.2 ± 1.0	6.5 ± 0.7	3.1 ± 0.4	7.2
Cr	18.5 ± 1.9	12.4 ± 1.2	7.8 ± 0.8	5.2 ± 0.5	2.4 ± 0.3	7.7

Источник: разработано автором.

Примечание. Коэффициент обогащения определён как отношение концентрации элемента в промышленной зоне к соответствующему фоновому значению. Он характеризует относительное пространственное обогащение растительного материала.

Интерпретация таблицы 3 показывает, что коэффициент обогащения свинцом для мха составляет 17,7, тогда как для вымытых листьев липы этот показатель не превышает 5,7. Столь высокая чувствительность гипнума обусловлена отсутствием кутикулы и непрерывным поглощением элементов из атмосферной влаги. При этом важно отметить, что пространственный градиент (промышленная зона > магистраль > селитебная > парк > фон) остается строго монотонным как для мхов, так и для древесных тканей. Сопоставление с данными стационарных постов мониторинга взвешенных веществ (PM10) показало, что инструментальные замеры фиксировали лишь кратковременные пики концентраций пыли в дни неблагоприятных метеоусловий, в то время как тканевые концентрации в листьях и талломах интегрировали кумулятивную нагрузку за весь вегетационный период. Это подтверждает тезис о том, что биологические индикаторы обеспечивают более адекватную оценку

экологического риска для здоровья населения, чем разовые инструментальные пробы.

ГИС-карты, построенные по данным биоиндикации, позволили выявить пространственные аномалии загрязнения. В частности, карты интерполяции концентраций свинца и цинка по данным мха четко очертили зоны влияния промышленных выбросов, простирающиеся на 3–4 километра в направлении преобладающих ветров. Карты, построенные по данным о массе пыли на листьях липы, визуализировали локальные очаги запыления вдоль транспортных артерий, которые не всегда совпадали с зонами максимального тканевого накопления металлов. Это указывает на необходимость дифференцированного подхода: мхи особенно информативны для оценки суммарной нагрузки от газоаэрозольных выбросов и фонового загрязнения, тогда как древесные растения с шероховатой поверхностью листьев — для оценки осаждения твердых частиц и пыли.

Практическое значение исследования состоит в разработке научно обоснованных рекомендаций по подбору видов растений для городского озеленения. Для создания защитных зеленых зон вокруг промышленных предприятий и вдоль крупных автомагистралей мы рекомендуем приоритетное использование липы мелколистной. Ее высокая пылеулавливающая способность в сочетании с умеренной толерантностью к тканевому накоплению свинца и цинка (согласно рассчитанному APTI) позволяет эффективно снижать концентрацию аэрозолей в приземном слое воздуха без достижения пороговых уровней фитотоксичности. Березу повислую, демонстрирующую высокую чувствительность и выраженные морфофизиологические нарушения (некрозы, хлорозы) при превышении ПДК, целесообразно использовать исключительно в качестве раннего биоиндикатора в парковых и рекреационных зонах, где уровень техногенной нагрузки минимизирован. Интеграция мхов в структуру городских биоценозов (например, в виде бриоцинозов на затененных участках или в составе зеленых крыш) обеспечит непрерывный мониторинг мелкодисперсных

аэрозолей и стойких органических поллютантов, формируя многоуровневую систему экологической безопасности урбанизированных территорий.

Выводы. Проведенное сопоставление накопительной способности бриофитов и листового аппарата древесных пород подтверждает целесообразность их совместного применения в системах экологического мониторинга. При этом необходимо четко разграничивать функциональную роль каждого объекта. Мхи, в силу отсутствия кутикулы и специфического ионного обмена, выступают высокочувствительными интеграторами валового атмосферного выпадения, фиксируя как газообразные фракции, так и мелкодисперсные аэрозоли. Древесные растения, напротив, наиболее информативны при оценке локальной интерцепции твердых частиц, особенно вблизи магистралей и промышленных узлов, где механическое осаждение пыли на шероховатую поверхность листьев доминирует над газовой сорбцией.

Вместе с тем, интерпретация полученных данных сталкивается с рядом методологических ограничений. Прямое математическое сравнение абсолютных концентраций поллютантов в тканях мхов и листьях деревьев методологически некорректно. Различия в морфофизиологической организации исследуемых таксонов приводят к тому, что даже при идентичном уровне фонового загрязнения бриофиты демонстрируют многократно более высокие показатели накопления. На сегодняшний день отсутствует универсальный коэффициент пересчета, позволяющий перевести данные тканевого анализа в точные физические концентрации веществ в приземном слое атмосферы. Исследователю приходится опираться на относительные показатели и градиентный анализ, что снижает точность абсолютной количественной оценки, хотя и сохраняет высокую надежность для выявления пространственных аномалий.

Существенное влияние на результаты биоиндикации оказывают локальные эколого-топографические факторы. Конфигурация городской застройки, формирующая уличные каньоны, способна многократно усиливать или,

наоборот, экранировать перенос загрязняющих веществ. Кроме того, метеорологические условия в период, предшествующий отбору проб, вносят значительную погрешность. Интенсивные осадки частично вымывают эпифитную пыль с поверхности листьев и талломов, тогда как штилевая погода способствует ее накоплению. Игнорирование этих факторов неизбежно ведет к искажению реальной картины загрязнения и снижению воспроизводимости результатов.

Указанные обстоятельства обусловливают необходимость строгой сезонной и фенологической стандартизации полевых работ. Возраст листовой пластинки напрямую определяет толщину кутикулы и плотность трихом, что критически меняет ее пылеудерживающую способность. Молодые листья весенней генерации накапливают элементы иначе, чем зрелые, завершившие вегетацию. Аналогичная ситуация наблюдается у мхов: их прирост и, соответственно, объем поглощающей поверхности непостоянны в течение года. Для обеспечения репрезентативности и сопоставимости данных, собираемых в разные годы или на разных территориях, отбор биоматериала следует проводить в один и тот же четко определенный фенологический период. Оптимальным представляется период максимального развития вегетативных органов, предшествующий началу массового листопада, когда кумулятивный эффект за летний сезон достигает своего пика, а процессы ремобилизации элементов из тканей еще не запущены.

Соблюдение строгих протоколов пробоподготовки и временной синхронизации превращает пассивный биомониторинг из вспомогательного инструмента в полноценную основу для принятия градостроительных решений. Дальнейшее развитие направления требует разработки видоспецифичных поправочных алгоритмов, учитывающих локальные климатические аномалии. Только при условии глубокого понимания физиологических механизмов интерцепции поллютантов растительными тканями ботаническая индикация сможет составить надежную альтернативу дорогостоящим сетям аппаратного

мониторинга в условиях плотно застроенных урбанизированных ландшафтов.

Список литературы

1. Shvetsova M. S., Kamanina I. Z., Zinicovscaia I., Chaligava O., Nekhoroshkov P. S., Yushin N. S. Active Moss Biomonitoring of Airborne Potentially Toxic Elements in Recreational Areas of Moscow // Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 196. Art. 81. DOI: 10.1007/s10661-023-12210-9.

2. Бельская Е. А., Замшина Г. А. Тяжелые металлы в листьях березы в период сокращения выбросов крупного медеплавильного завода // Экология. 2023. № 6. С. 446–452. DOI: 10.31857/S0367059723060112.

3. Aničić Urošević M., Lazo P., Stafilov T., Nečemer M., Bačeva Andonovska K. et al. Active Biomonitoring of Potentially Toxic Elements in Urban Air by Two Distinct Moss Species and Two Analytical Techniques: A Pan-Southeastern European Study // Air Quality, Atmosphere & Health. 2023. Vol. 16. P. 595–612. DOI: 10.1007/s11869-022-01291-z.

4. Matić M., Pavlović D., Perović V., Čakmak D., Kostić O., Mitrović M., Pavlović P. Assessing the Potential of Urban Trees to Accumulate Potentially Toxic Elements: A Network Approach // Forests. 2023. Vol. 14. No. 11. Art. 2116. DOI: 10.3390/f14112116.

5. Mitrović M., Kostić O., Miletić Z., Marković M., Radulović N., Sekulić D., Jarić S., Pavlović P. Bioaccumulation of Potentially Toxic Elements in Tilia tomentosa Moench Trees from Urban Parks and Potential Health Risks from Using Leaves and Flowers for Medicinal Purposes // Forests. 2023. Vol. 14. No. 11. Art. 2204. DOI: 10.3390/f14112204.

6. Bibi D., Tőzsér D., Sipos B., Molnár V. É., Simon E., Tóthmérész B. et al. Complex Study of Air Pollution Based on Tree Species in Vienna // Air Quality, Atmosphere & Health. 2024. Vol. 17. P. 417–424. DOI: 10.1007/s11869-023-01452-8.

7. Rajandu E., Kaljuvee K.-L., Kulp M., Kaasik M., Elvisto T., Küttim M. Syntrichia ruralis as a Suitable Bioindicator for Urban Areas — the Case Study of Tallinn City // Folia Cryptogamica Estonica. 2024. Vol. 61. DOI: 10.12697/fce.2024.61.03.

8. Isinkaralar K., Isinkaralar O., Koc I., Cobanoglu H., Canturk U. Accumulation Analysis and Overall Measurement to Represent Airborne Toxic Metals with Passive Tree Bark Biomonitoring Technique in Urban Areas // Environmental Monitoring and Assessment. 2024. Vol. 196. Art. 689. DOI: 10.1007/s10661-024-12879-6.

9. Widory D., Meyer C., Leblond S., Plasencia Sánchez E., Lequy E., Morera-Gómez Y. Characterizing and Sourcing Metal Air Contamination Coupling Concentrations and Lead Isotopes from Moss Biomonitoring in Urban Cemeteries // Discover Atmosphere. 2024. Vol. 2. Art. 20. DOI: 10.1007/s44292-024-00022-6.

10. Sánchez-Landero L. A., Benítez-Badillo G., Sangabriel-Conde W., Alvarado-Castillo G., Lagunes-Diaz E. G. Surface Deposits and Intracellular Concentration of Atmospheric Particles in Foliage of Urban Forests in the Valley of Mexico // Trees, Forests and People. 2024. Vol. 15. Art. 100492. DOI: 10.1016/j.tfp.2023.100492.

11. Moura B. B., Zammarchi F., Manzini J., Yasutomo H., Brilli L., Vagnoli C., Gioli B. et al. Assessment of Seasonal Variations in Particulate Matter Accumulation and Elemental Composition in Urban Tree Species // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Art. 118782. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118782.

12. Zinicovscaia I., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Nekhoroshkov P. Impact of Traffic-Related Emissions on Air Quality Assessed via Moss Bags Technique // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 494. Art. 138588. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138588.

13. Mohtadi A., Hatami-Manesh M. Assessment of Resistance and Biochemical Responses of Tree Species as a Biomonitor of Heavy Metals Pollution in an Urban-Industrial Setting (Yasouj, Iran) // Chemosphere. 2025. Vol. 378. Art. 144402. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144402.

14. Su T.-H., Lin C.-S., Liu C.-P. City-Scale $PM_{2.5}$ Removal by Urban Trees: Validation of i-Tree Eco and Biomonitoring of $PM_{2.5}$-Bound Trace Elements // Ecological Indicators. 2025. Vol. 181. Art. 114390. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114390.

15. Gecheva G., Petkova Z., Damyanov S., Georgieva D., Baev V., Gozmanova M.,

Apostolova-Kuzova E., Yahubyan G. Using Moss Walls for Air Quality Monitoring: Extending Their Utility Beyond Traditional Green Infrastructure // International Journal of Plant Biology. 2025. Vol. 16. No. 2. Art. 44. DOI: 10.3390/ijpb16020044.

16. Plášek V., Łuczak K., Kusza G., Režnarová H., Nowak A. Selecting Suitable Moss Indicators for Routine Bioindication of Roadside Air Pollution // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 10275.

17. Chaligava O., Zinicovscaia I., Gorelova S., Vergel K., Yushin N. Species-Specific Metal Accumulation in Moss Bags Exposed to Urban and Industrial Pollution // Environmental Research. 2026. Vol. 306. Pt. 1. Art. 125155. DOI: 10.1016/j.envres.2026.125155.

18. Gkini E., Tsakaldimi M., Mousios I., Chatzistathis T., Mpountla A. et al. Accumulation of Metals in the Leaves of Different Urban Forest Tree Species and Its Relation to the Proximity to the Airport // Environmental Science and Pollution Research. 2026. Vol. 33. P. 1353–1364. DOI: 10.1007/s11356-026-37427-2.

References

1. Shvetsova M. S., Kamanina I. Z., Zinicovscaia I., Chaligava O., Nekhoroshkov P. S., Yushin N. S. Active Moss Biomonitoring of Airborne Potentially Toxic Elements in Recreational Areas of Moscow // Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 196. Art. 81. DOI: 10.1007/s10661-023-12210-9.

2. Bel`skaya E. A., Zamshina G. A. Tyazhely`e metally` v list`yax berezy` v period sokrashheniya vy`brosov krupnogo medeplavil`nogo zavoda // E`kologiya. 2023. № 6. S. 446–452. DOI: 10.31857/S0367059723060112.

3. Aničić Urošević M., Lazo P., Stafilov T., Nečemer M., Bačeva Andonovska K. et al. Active Biomonitoring of Potentially Toxic Elements in Urban Air by Two Distinct Moss Species and Two Analytical Techniques: A Pan-Southeastern European Study // Air Quality, Atmosphere & Health. 2023. Vol. 16. P. 595–612. DOI: 10.1007/s11869-022-01291-z.

4. Matić M., Pavlović D., Perović V., Čakmak D., Kostić O., Mitrović M., Pavlović P. Assessing the Potential of Urban Trees to Accumulate Potentially Toxic Elements:

A Network Approach // Forests. 2023. Vol. 14. No. 11. Art. 2116. DOI: 10.3390/f14112116.

5. Mitrović M., Kostić O., Miletić Z., Marković M., Radulović N., Sekulić D., Jarić S., Pavlović P. Bioaccumulation of Potentially Toxic Elements in Tilia tomentosa Moench Trees from Urban Parks and Potential Health Risks from Using Leaves and Flowers for Medicinal Purposes // Forests. 2023. Vol. 14. No. 11. Art. 2204. DOI: 10.3390/f14112204.

6. Bibi D., Tőzsér D., Sipos B., Molnár V. É., Simon E., Tóthmérész B. et al. Complex Study of Air Pollution Based on Tree Species in Vienna // Air Quality, Atmosphere & Health. 2024. Vol. 17. P. 417–424. DOI: 10.1007/s11869-023-01452-8.

7. Rajandu E., Kaljuvee K.-L., Kulp M., Kaasik M., Elvisto T., Küttim M. Syntrichia ruralis as a Suitable Bioindicator for Urban Areas — the Case Study of Tallinn City // Folia Cryptogamica Estonica. 2024. Vol. 61. DOI: 10.12697/fce.2024.61.03.

8. Isinkaralar K., Isinkaralar O., Koc I., Cobanoglu H., Canturk U. Accumulation Analysis and Overall Measurement to Represent Airborne Toxic Metals with Passive Tree Bark Biomonitoring Technique in Urban Areas // Environmental Monitoring and Assessment. 2024. Vol. 196. Art. 689. DOI: 10.1007/s10661-024-12879-6.

9. Widory D., Meyer C., Leblond S., Plasencia Sánchez E., Lequy E., Morera-Gómez Y. Characterizing and Sourcing Metal Air Contamination Coupling Concentrations and Lead Isotopes from Moss Biomonitoring in Urban Cemeteries // Discover Atmosphere. 2024. Vol. 2. Art. 20. DOI: 10.1007/s44292-024-00022-6.

10. Sánchez-Landero L. A., Benítez-Badillo G., Sangabriel-Conde W., Alvarado-Castillo G., Lagunes-Diaz E. G. Surface Deposits and Intracellular Concentration of Atmospheric Particles in Foliage of Urban Forests in the Valley of Mexico // Trees, Forests and People. 2024. Vol. 15. Art. 100492. DOI: 10.1016/j.tfp.2023.100492.

11. Moura B. B., Zammarchi F., Manzini J., Yasutomo H., Brilli L., Vagnoli C., Gioli B. et al. Assessment of Seasonal Variations in Particulate Matter Accumulation and Elemental Composition in Urban Tree Species // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Art. 118782. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118782.

12. Zinicovscaia I., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Nekhoroshkov P. Impact of Traffic-Related Emissions on Air Quality Assessed via Moss Bags Technique // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 494. Art. 138588. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138588.

13. Mohtadi A., Hatami-Manesh M. Assessment of Resistance and Biochemical Responses of Tree Species as a Biomonitor of Heavy Metals Pollution in an Urban-Industrial Setting (Yasouj, Iran) // Chemosphere. 2025. Vol. 378. Art. 144402. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144402.

14. Su T.-H., Lin C.-S., Liu C.-P. City-Scale $PM_{2.5}$ Removal by Urban Trees: Validation of i-Tree Eco and Biomonitoring of $PM_{2.5}$-Bound Trace Elements // Ecological Indicators. 2025. Vol. 181. Art. 114390. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114390.

15. Gecheva G., Petkova Z., Damyanov S., Georgieva D., Baev V., Gozmanova M., Apostolova-Kuzova E., Yahubyan G. Using Moss Walls for Air Quality Monitoring: Extending Their Utility Beyond Traditional Green Infrastructure // International Journal of Plant Biology. 2025. Vol. 16. No. 2. Art. 44. DOI: 10.3390/ijpb16020044.

16. Plášek V., Łuczak K., Kusza G., Režnarová H., Nowak A. Selecting Suitable Moss Indicators for Routine Bioindication of Roadside Air Pollution // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 10275.

17. Chaligava O., Zinicovscaia I., Gorelova S., Vergel K., Yushin N. Species-Specific Metal Accumulation in Moss Bags Exposed to Urban and Industrial Pollution // Environmental Research. 2026. Vol. 306. Pt. 1. Art. 125155. DOI: 10.1016/j.envres.2026.125155.

18. Gkini E., Tsakaldimi M., Mousios I., Chatzistathis T., Mpountla A. et al. Accumulation of Metals in the Leaves of Different Urban Forest Tree Species and Its Relation to the Proximity to the Airport // Environmental Science and Pollution Research. 2026. Vol. 33. P. 1353–1364. DOI: 10.1007/s11356-026-37427-2.

Статья поступила в редакцию 18.12.2025; одобрена после рецензирования 29.01.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 18.12.2025; approved after peer review 29.01.2026; accepted for publication 01.09.2026.