

**Александр Петрович Колбас¹, Наталья Юрьевна Колбас²,
Николай Васильевич Михальчук³, Валентин Сергеевич Нестерук⁴**

¹канд. биол. наук, доц., ст. науч. сотрудник Полесского аграрно-экологического института
Национальной академии наук Беларуси,

докторант Института природопользования Национальной академии наук Беларуси

²канд. биол. наук, доц., доц. каф. биологических и химических технологий

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина,

ст. науч. сотрудник Полесского аграрно-экологического института

Национальной академии наук Беларуси

³канд. биол. наук, доц., директор Полесского аграрно-экологического института

Национальной академии наук Беларуси

⁴мл. науч. сотрудник Полесского аграрно-экологического института

Национальной академии наук Беларуси,

магистрант Университета Национальной академии наук Беларуси

Aliaksandr Kolbas¹, Natallia Kolbas², Mikalai Mikhalchuk³, Valentin Nesteruk⁴

¹Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher
of the Polesie Agrarian Ecological Institute of National Academy of Sciences of Belarus,
Doctoral Student of the Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus

²Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Biological and Chemical Technologies
of Brest State A. S. Pushkin University,

Senior Researcher of the Polesie Agrarian Ecological Institute
of National Academy of Sciences of Belarus

³Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Director of the Polesie Agrarian Ecological Institute of National Academy of Sciences of Belarus

⁴Junior Researcher of the Polesie Agrarian Ecological Institute
of National Academy of Sciences of Belarus, Master's Student
of the University of the National Academy of Sciences of Belarus

e-mail: ¹kolbas77@mail.ru; ²natachulka_@mail.ru; ³info@paei.by; ⁴valik.nesteruk@gmail.com

ОЦЕНКА АЭРАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИМПАКТНЫХ ЗОН МЕТОДОМ МОХОВЫХ ЛОВУШЕК*

Представлены результаты исследования аэрального загрязнения потенциально токсичными элементами в импактных зонах промышленных предприятий и урбоэкосистем Брестского региона с использованием метода моховых ловушек. Методика включала подготовку моховых ловушек из *Sphagnum*, их экспозицию в течение трех месяцев на различных расстояниях от источников эмиссии, последующий химический анализ методом ICP-AES. Результаты показали значительное превышение фоновых концентраций для Pb, Cd, Sb, Sn, V, Ni и Mo вблизи промышленного предприятия, с экспоненциальным снижением загрязнения по мере удаления от источника. Анализ главных компонент (PCA) позволил выявить три ассоциации элементов, отражающие их происхождение: промышленные выбросы (Pb, Cd, Sb, Sn), региональный и трансграничный перенос (Fe, Cu, Cr, Co, Zn) и смешанные источники (Mo, Ni, V). Отмечена роль лесополос в снижении уровня загрязнения. В центральной части города зафиксировано повышенное содержание Pb, Ni и Sn. Полученные результаты позволяют рекомендовать данный подход не только для локального мониторинга, но и для исследования временных и пространственных тенденций, включая трансграничный перенос поллютантов.

Ключевые слова: аэральное загрязнение, биомониторинг, промышленные эмиссии, моховые ловушки, фоновые территории, тяжелые металлы, урбоэкосистемы, *Sphagnum*.

*Работа выполнена в рамках ГПНИ Задание 1.02, НИР-2 «Оценка загрязнения тяжелыми металлами и иными экотоксикантами почв, вод, биологических объектов природных и природно-техногенных геосистем юго-запада Беларуси и научное обоснование минимизации сопутствующих экологических рисков» (10. «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг.; подпрограмма 10.1 «Природные ресурсы и их рациональное использование»).

Assessment of Aerial Pollution in Impact Zones by Potentially Toxic Elements Using the Moss Bags Method

The article presents the results of a study of aerial pollution with potentially toxic elements in the impact zones of industrial enterprises and urban ecosystems of the Brest region using the moss trap method. The technique included the preparation of moss traps from *Sphagnum* sp. material, their exposure for three months at different distances from the emission sources, and subsequent chemical analysis using the ICP-AES method. The results showed a significant excess of background concentrations for Pb, Cd, Sb, Sn, V, Ni and Mo near the industrial enterprise, with an exponential decrease in pollution with distance from the source. Principal component analysis (PCA) revealed three associations of elements reflecting their origin: industrial emissions (Pb, Cd, Sb, Sn), regional and transboundary transport (Fe, Cu, Cr, Co, Zn) and mixed sources (Mo, Ni, V). The role of forest belts in reducing the pollution level is noted. Increased content of Pb, Ni and Sn was recorded in the central part of the city. The obtained results allow us to recommend this approach not only for local monitoring, but also for studying temporal and spatial trends, including transboundary transport of pollutants.

Key words: aerial pollution, Brest region, industrial emissions, sphagnum bags, background areas, heavy metals, urban ecosystems.

Введение

Для отдельного учета аэрального загрязнения в последнее десятилетие в мире применяются методы бриоиндикации с использованием моховых ловушек [1]. Благодаря широкому распространению, низкой стоимости и высокой адсорбционной способности загрязняющих веществ наземные мхи используются чаще других сорбентов в мониторинговых исследованиях загрязнения атмосферы тяжелыми металлами (ТМ) в странах ЕС [2; 3], России [4], Казахстане [5], Беларуси [6], а также для оценки временных и пространственных тенденций.

Одной из особенностей мхов является способность поглощать вещества всей поверхностью непосредственно из атмосферы, отражая тем самым химический состав окружающей среды. Накопление ТМ мхами зависит от степени и состава загрязнения, продолжительности воздействия загрязнителя, сорбционной емкости мхов, особенностей клеточной мембраны. В отличие от широко применяемой в экомониторинге лишеноиндикации бриоиндикация с использованием моховых ловушек позволяет проводить исследования не только на постоянных площадках и модельных деревьях, но и на темпоральных экспериментальных площадках, сокращая время наблюдений. При этом аккумуляция ТМ у мхов менее зависит от климатических условий, чем у лишайников [5]. Перспективным тест-объектом изучения аэрального загрязнения является листостебельный мох рода сфагнум (*Sphagnum* L.) [7].

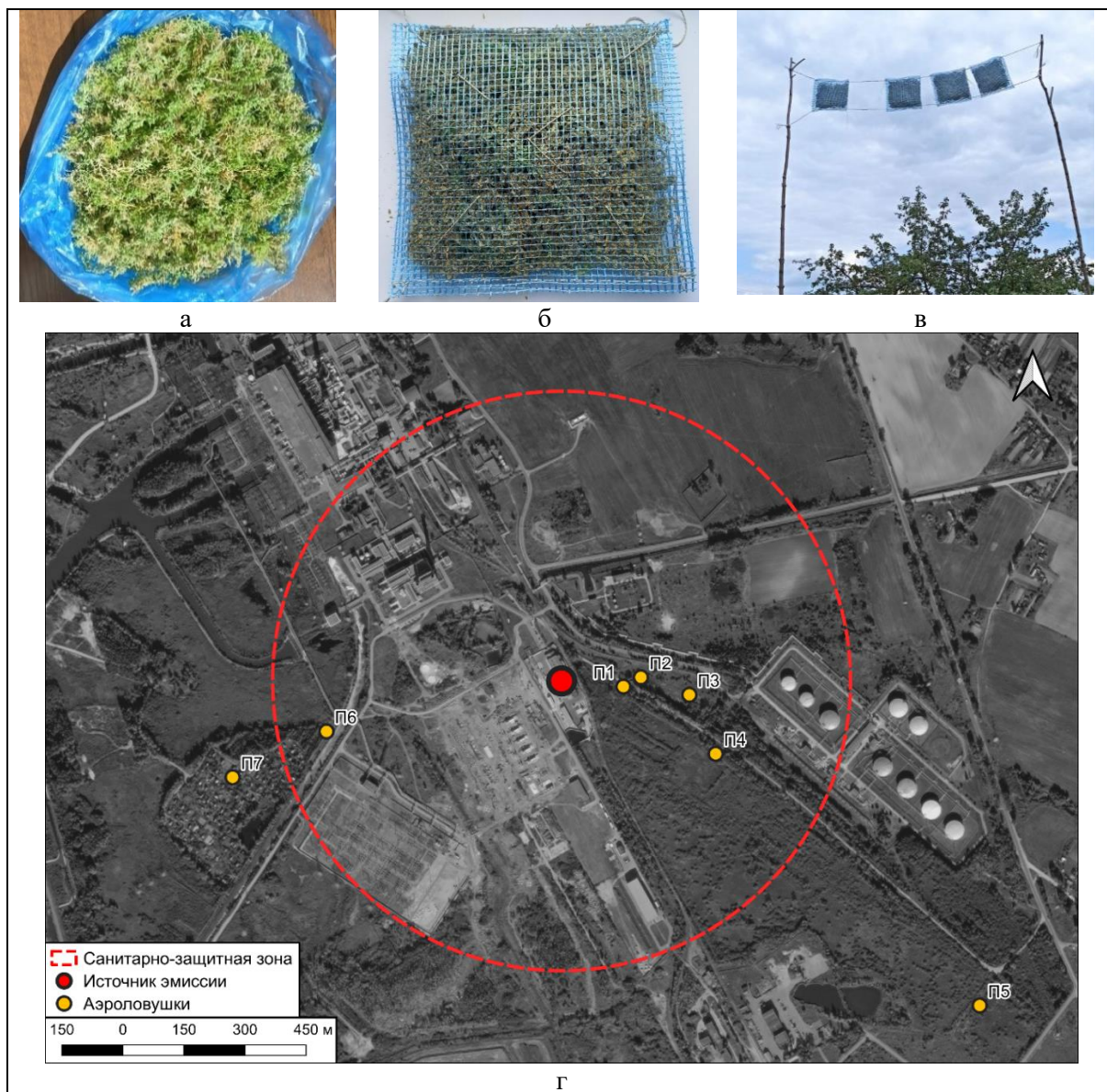
Целью данного исследования было апробирование методики оценки аэрального загрязнения ТМ лесных экосистем и огородных участков в зонах влияния аккумуляторного производства в Брестском регионе, а также урбанизированных территорий г. Бреста с использованием метода сфагновых ловушек.

Материалы и методы исследования

Для изучения аэрального загрязнения ТМ различных импактных зон за основу брали методику, описанную в [7], и адаптировали ее под цели настоящего исследования. Методика включала следующие этапы: отбор и подготовка растительного материала, подготовка аэроловушек со сфагнумом, установка аэроловушек и их экспозиция, определение в сфагнуме содержания 15 элементов, статистический анализ и интерпретация полученных результатов.

Растения сфагнума (*Sphagnum* sp. L.) (рисунок 1а) заготавливали в естественных фитоценозах фоновой территории (Государственный биологический заказник «Бусловка», Березовский р-н Брестской обл.). Подготовка растительного материала включала сортировку, очистку, промывку (4 цикла по 20 мин. каждый при встряхи-

вании: 10 мМ ЭДТА и 3 промывки дистиллированной водой), сушку (3 цикла по 8 ч каждый при 50, 80 и 100 °С). Для изготовления аэроловушек использовали полимерную сетку. Перед использованием сетку промывали в 10 мМ ЭДТА и 3 раза в дистиллированной воде для удаления следов загрязнения. Прямоугольные плоские пакеты (20 × 20 см, размер ячеек – 5 мм) заполняли подготовленным сфагнумом из расчета 30 мг/см² и закрепляли нейлоновой нитью (рисунок 1б).



а) отсортированный растительный материал; б) аэроловушки со сфагнумом
в) экспозиция аэроловушек; г) расположение точек мониторинга в лесных экосистемах
и на приусадебных участках в зоне эмиссий промышленного предприятия

Рисунок 1 – Подготовка и установка аэроловушек со сфагнумом

Мох внутри пакета распределяли равномерно для сведения к минимуму перекрытия и сжатия во время экспозиции. Готовые аэроловушки со сфагнумом упаковывали под вакуумом и хранили до размещения в местах экспозиции; контрольные аэроловушки, для которых экспозиция не предусматривалась, хранили в защищенном от прямых солнечных лучей месте до окончания эксперимента.

Первая часть сфагновых ловушек была расположена в естественных (лесных) экосистемах в зоне влияния промышленного предприятия (П) – ОАО «Белинвест-порг-Сплав» (г. Белоозерск, Брестская обл.) на разном удалении от источника эмиссии по первой трансекте (направление – юго-восток): 150, 200, 320, 420 м и 1280 м (П1 б П5 соответственно) (таблица 1, рисунок 1г). По второй трансекте (направление – запад – юго-запад) в зоне влияния того же предприятия были заложены 2 площадки: на расстоянии 590 м (П6) от источника эмиссий до экранирующей лесополосы и 840 м (П7) – после лесополосы на территориях приусадебных участков.

Вторая группа ловушек размещалась в урбоэкосистеме г. Бреста как в центральной части города (У1), так и в частной застройке периферического микрорайона (У2). Кроме того, для изучения фоновой (Ф) атмосферного содержания ТМ сфагновые ловушки были установлены в условиях с минимальным техногенным воздействием (д. Луково, Малоритский р-н Брестской обл.).

Аэроловушки со сфагнумом (по 4 шт. для каждой площадки) подвешивали горизонтально на деревянных шестах на высоте 4 м (рисунок 1в) и экспонировали в течение 3 месяцев. В извлеченном из аэроловушек сфагнуме, а также в сфагнуме контрольных аэроловушек проводили химический анализ содержания 15 элементов (Co, Cr, Cu, Cd, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, V, Zn, As и Se) методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES). Пробоподготовку растительного материала для элементного анализа проводили согласно ГОСТ 26929-94. Для этого растительные пробы измельчали, высушивали до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 65 °С, затем размалывали на лабораторной мельнице и просеивали через сито с отверстиями диаметром 1 мм. На следующем этапе производили сухую минерализацию проб с последующей обработкой золы азотной кислотой.

Анализ производили в лаборатории биогеохимии Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси по ГОСТ 30538-97 с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой iCAP 7200 ICP-AES DUO (производства Thermo Scientific). Содержание химических элементов выражали в мг на кг воздушно-сухого растительного материала.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ Microsoft Excel и R версия 4.3.1 (Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия). Она включала в себя дисперсионный анализ и создание графиков анализа главных компонент (PCA – Principal Component Analysis), а также корреляционный анализ параметров и Tukey-тест. Значения p не превышали 0,05.

Таблица 1 – Расположение и кодировки пробных площадок

Код	Исследуемая территория	Расположение
П1	Лесная экосистема	ЮВ трансекта, удаление 150 м от предприятия
П2	Лесная экосистема	ЮВ трансекта, удаление 200 м от предприятия
П3	Лесная экосистема	ЮВ трансекта, удаление 320 м от предприятия
П4	Лесная экосистема	ЮВ трансекта, удаление 420 м, от предприятия
П5	Лесная экосистема	ЮВ трансекта, удаление 1280 м от предприятия
П6	Приусадебный участок (до лесополосы)	ЗЮЗ трансекта, удаление 590 м от предприятия
П7	Приусадебный участок (после лесополосы)	ЗЮЗ трансекта, удаление 840 м от предприятия
У1	Урбоэкосистема	центральная часть г. Бреста
У2	Урбоэкосистема	периферическая часть г. Бреста
Ф	Условно фоновая территория	д. Луково, Малоритский р-н

Результаты и их обсуждение

Поэлементный анализ для импактной зоны промышленного предприятия выявил, что содержание Pb в сфагновых ловушках варьировало от 0,187 до 64,05 мг/кг

(таблица 2), достоверно отличалось от фона (в 4–1372 раза) и снижалось в последовательности $P1 > P2 > P3 > P4 > P6 \geq P7 > P5$. Накопление Cd составляло от 0,007 до 1,37 мг/кг, снижалось в последовательности $P1 > P2 > P3 > P4 > \text{фон} > P5 > P6 \geq P7$. Превышение фоновых значений в 3–27 раз выявлено только для 4 площадок юго-восточной трансекты ($P1 - P4$).

Концентрация сурьмы находилась на уровне от 0,204 до 1,64 мг/кг (таблица 2), снижалась в последовательности $P1 > P2 > P3 \geq P4 > \text{фон} \geq P6 \geq P7 \geq P5$. Превышение фоновых значений в 1,8 – 4,6 раза выявлено также только для 4-х площадок юго-восточной трансекты ($P1 - P4$). Сходная тенденция выявлена для олова, содержание которого составило 0,025–1,58 мг/кг и снижалось в последовательности $P1 > P2 > P3 \geq P4 > P5 \geq \text{фон} \geq P7 \geq P6$. Зафиксировано превышение фоновых значений элемента на площадках $P1 - P4$ в 10–45 раз.

Таблица 2 – Накопление некоторых химических элементов в сфагнуме аэроловушек, мг/кг

Пробная площадка	Pb	Cd	Sb	Sn	V	Ni	Mo	Fe	As
P1	64,05 a	1,370 a	1,642 a	1,58 a	2,30 c	0,69 b	0,092 a	67,35 b	0,127 b
P2	40,31 b	0,716 b	1,090 b	0,907 b	1,78 d	0,410 c	0,080 a	39,23 c	0,147 a
P3	19,49 c	0,288 c	0,710 c	0,467 c	2,89 b	0,587 b	0,065 b	42,43 c	0,115 b
P4	14,79 d	0,156 d	0,645 c	0,353 c	2,24 c	0,410 c	0,050 c	13,53 e	0,101 b
P5	0,187 f	0,023 f	0,204 e	0,035 d	1,16 e	0,243 d	0,040 c	11,58 e	0,067 c
P6	0,963 e	0,007 g	0,297 d	0,025 d	3,80 a	1,03 a	0,075 a	12,40 e	0,090 b
P7	0,787 e	0,009 g	0,242 e	0,030 d	0,89 e	0,267 d	0,040 c	64,31 b	0,097 b
У1	0,287 f	0,024 f	0,391 d	0,053 d	0,19 f	0,367 c	0,041 c	108,37 a	0,103 b
У2	0,097 g	0,017 f	0,368 d	0,038 d	0,19 f	0,100 e	0,014 d	75,56 b	0,093 b
Ф	0,047 g	0,051 e	0,357 d	0,035 d	0,28 f	0,162 e	0,033 c	138,52 a	0,159 a

Примечание – a, b, c, d, e, f, g – статистические различия средних значений для конкретного химического элемента по пробным площадкам, Tukey-тест, при $p < 0,05$.

Содержание ванадия в сфагнуме импактной зоны варьировало от 0,893 до 3,8 мг/кг (таблица 2), достоверно отличалось от фона (в 3–13,5 раза) и снижалось в последовательности $P6 > P3 > P1 \geq P4 > P2 > P5 > P7$. Сходная последовательность распределения выявлена для никеля, уровни которого варьировали от 0,243 до 1,03 мг/кг и превышали контроль в 1,5–6 раз.

Накопление молибдена в сфагнуме варьировало от 0,04 до 0,092 мг/кг (таблица 2), снижалось в последовательности $P1 > P2 > P6 \geq P3 > P4 > P7 > P5$, и для площадок $P1 - P4$ и $P6$ значение параметра превышало фоновые в 1,5 – 2,8 раза.

В нашем исследовании максимальное содержание мышьяка выявлено в сфагнуме фоновой территории ($0,159 \pm 0,011$ мг/кг) (таблица 2), что может свидетельствовать об активном участии данного элемента в трансграничном переносе. Содержание As в условиях импактной зоны предприятия варьировало от 0,04 до 0,092 мг/кг и снижалось в последовательности $P2 > P1 > P3 \geq P4 \geq P7 \geq P6 > P5$.

Накопление Fe выявлено в сфагнуме фоновой территории ($138,52 \pm 4,46$ мг/кг, или +60 % к контролю), $P1$ ($67,37 \pm 7,74$ мг/кг, или +30 % к контролю) и $P7$ ($285,85 \pm 9,34$ мг/кг, или +25 % к контролю) (таблица 2).

Содержание Cr и Co в сфагнуме в условиях аэрального загрязнения статистически не различалось с контролем, накопления этих ТМ не выявлено. Накопление Cr и Co было установлено в сфагнуме фоновой площадки ($0,18 \pm 0,001$ мг/кг и $0,033 \pm 0,005$ мг/кг соответственно и в обоих случаях составило приблизительно +30 % к контролю).

Выявленные особенности в накоплении на фоновой территории Fe, As, Mo, Cd, Sb и др., вероятно, связаны с влиянием трансграничного переноса. Однако данный аспект требует дальнейшего более детального изучения.

Содержание селена в сфагнуме аэроловушек находилось за пределами чувствительности прибора (менее 0,001 мг/г). Определение накопления пяти элементов (Cu, Zn, Mn, Co, Cr) представляло некоторые сложности, которые были связаны с флуктуацией данных, что может быть объяснено их вымыванием из ловушек подкисленными осадками. Как известно, при низких значениях pH растворимость этих элементов может повышаться [8]. В этой связи в таблице 2 приводятся цифровые данные о накоплении относительно контроля 9 элементов, а на рисунке 2 – визуализация по содержанию 14 элементов.

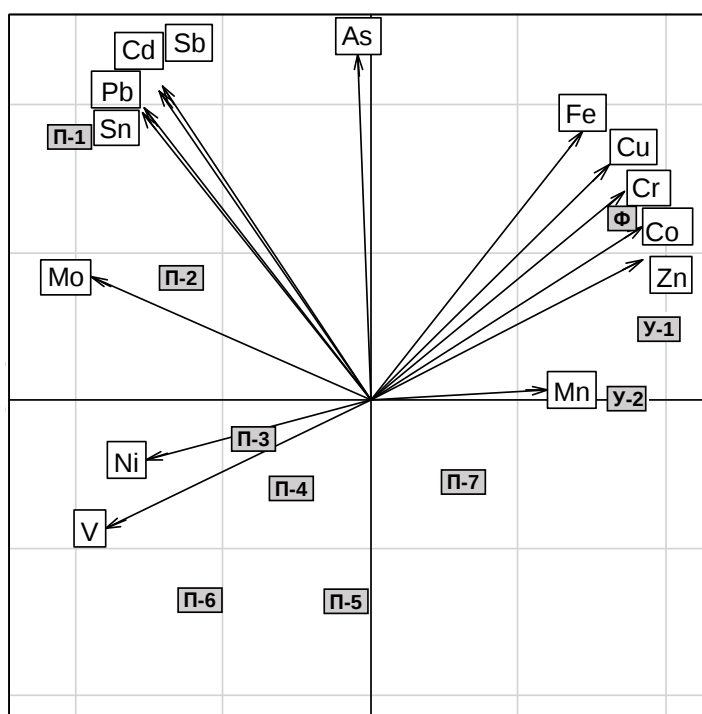


Рисунок 2 – Отображение концентраций ТМ в сфагновых ловушках в зависимости от стационара в пространстве двух факторов (РСА)
(кодировка согласно таблице 1)

Для сфагнума импактной промышленной зоны накопление изученных химических элементов снижается в ряду $Pb \geq Fe > V > Sb \geq Sn > Cd > Ni > As > Mo > Cr$; при этом Co, Cu, Mn и Zn не накапливаются. Для сфагнума фоновой территории установлена иная последовательность $Fe > Sb > V \geq Cu > Cr > Ni \geq As > Cd > Pb > Sn > Co \approx Mo$; при этом не накапливаются Mn и Zn. Согласно ранее полученным данным, *Sphagnum capillifolium* накапливает ТМ в следующем порядке: $As \approx Cu > Mo > Pb > V > Co > Cr > Zn$ [2], а мох *Pseudevernia furfuracea*, также используемый в биомониторинге, накапливает ТМ в следующем порядке: $Mo > Cu > As \approx Co \approx Ni > V > Pb$ [9].

Для центральной части урбоэкосистемы (У1) выявлены превышения фоновых значений в содержании свинца (6,1 раза), никеля (2,3 раза), олова (1,5 раза).

График двухфакторного анализа главных компонент для содержания элементов описывает 81,19 % общего варьирования (ось № 1 – 53,98 %, ось № 2 – 27,21 %) (рисунок 2). Можно выделить несколько ассоциаций, описываемых соответствующими

щими сценариями: первая ассоциация включает Pb, Cd, Sb, Sn и обусловлена главным образом близостью к промышленному источнику эмиссий (направление совпадает с вектором П1 – П5). Причем степень корреляции между содержанием ТМ пула очень высока и приближается к 1 (таблица 3), что может свидетельствовать об идентичности происхождения данного загрязнения.

При движении по трансекте П1 – П5 усиливается роль группы Mo, Ni, V, что может быть обусловлено эмиссиями из других источников, в т. ч. от промышленной площадки ДСУ. Для ТМ данной ассоциации по юго-восточной трансекте (П1 – П5) выявлен экспоненциальный характер распределения в зависимости от расстояния от источника эмиссии (рисунок 2), а для мышьяка и молибдена – линейный.

Таблица 3 – Корреляционная матрица концентраций ТМ в сфагновых ловушках

ТМ	Cd	Sb	Sn	V	Ni	Mo	Fe	Cr	As	Cu	Zn	Mn	Co
Pb	0,99	0,99	1,00	0,37	0,35	0,79	-0,13	-0,34	0,46	-0,24	-0,38	-0,41	-0,40
Cd		0,98	0,99	0,30	0,33	0,76	-0,04	-0,25	0,46	-0,17	-0,29	-0,44	-0,32
Sb			0,99	0,33	0,33	0,76	-0,05	-0,26	0,50	-0,13	-0,30	-0,31	-0,31
Sn				0,37	0,36	0,79	-0,12	-0,32	0,45	-0,22	-0,36	-0,41	-0,39
V					0,90	0,77	-0,70	-0,78	-0,09	-0,71	-0,89	-0,24	-0,80
Ni						0,80	-0,54	-0,50	-0,06	-0,44	-0,68	-0,17	-0,52
Mo							-0,46	-0,50	0,32	-0,45	-0,74	-0,41	-0,60
Fe									0,82	0,53	0,77	0,73	0,38
Cr									0,40	0,95	0,83	0,43	0,94
As										0,37	-0,01	0,07	0,24
Cu											0,85	0,56	0,92
Zn												0,43	0,90
Mn													0,58

Примечание – Серым цветом выделены статистически достоверные значения.

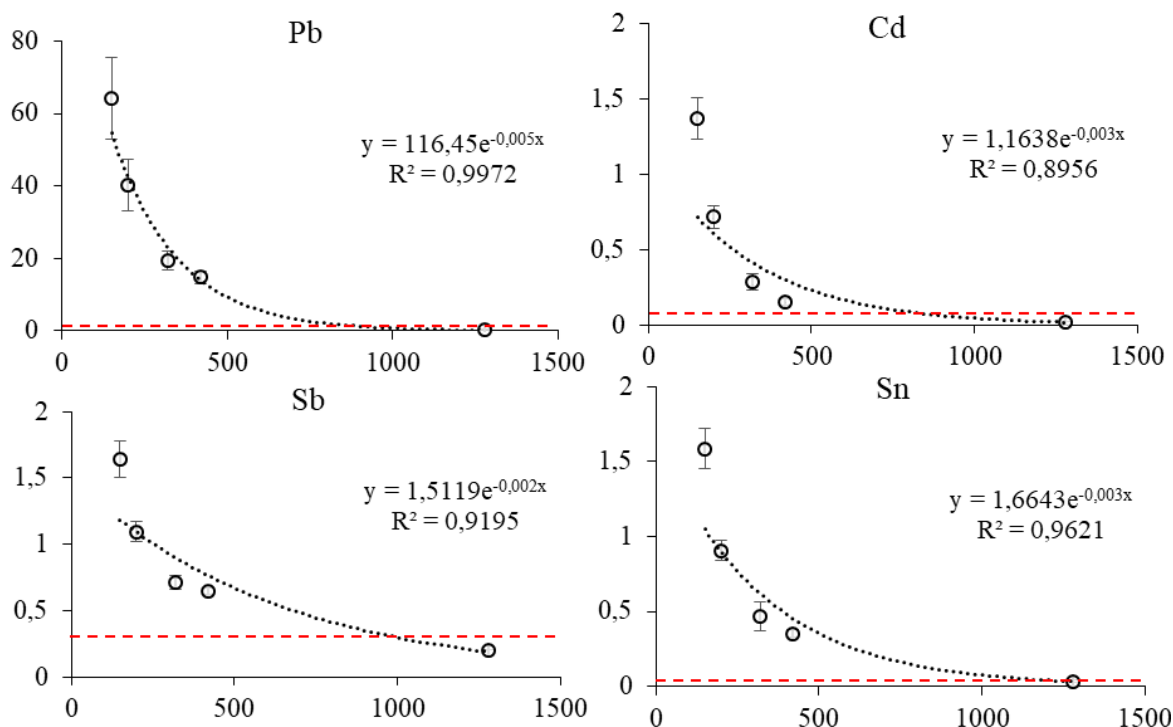
Третья ассоциация элементов (Fe, Cu, Cr, Co, Zn) расположена напротив второй и имеет с ней высокую обратную связь, причем связь между содержанием этих элементов внутри группы также довольно высока (таблица 3). Отмечается приуроченность их в первую очередь к фоновым площадкам. Повышенное содержание данных ТМ и мышьяка на территориях, удаленных от источников выбросов, объясняется влиянием как регионального, так и трансграничного переноса на данной территории. Ранее показано, что в западной части Республики Беларусь вклад внешних источников выбросов в выпадения некоторых ТМ варьирует от 90 до почти 100 % [6; 10]. В дальнейшем необходимо учитывать трансграничный перенос при выборе фоновых площадок.

Второй сценарий, который также тяготеет к группе Fe, Cu, Cr, Co, Zn, – это территории урбоэкосистем, особенно центральной части города. Повышенные содержания цинка в компонентах городских экосистем [11], в частности г. Бресте, отмечались и ранее в работах [12; 13], причем это загрязнение обусловлено в первую очередь передвижными источниками – автотранспортом.

Мышьяк, расположенный на графике между группами 1 и 3, не имеет достоверных связей ни с одним ТМ. Для марганца также не выявлено достоверных корреляций ни с одним из ТМ (таблица 3).

Согласно данным статистического анализа для юго-восточной трансекты П1 – П5 выявлена экспоненциальная зависимость между расстоянием от источника эмиссии поллютантов и содержанием Pb (коэффициент корреляции $R^2 = 0,997$, $p \leq 0,001$), Sn ($R^2 = 0,962$, $p \leq 0,001$), Sb ($R^2 = 0,919$, $p \leq 0,001$), Cd ($R^2 = 0,896$, $p \leq 0,01$) (рисунок 3), Ni ($R^2 = 0,750$, $p < 0,05$) и V ($R^2 = 0,649$, $p < 0,05$), а также линейная зависимость

для Cu ($R^2 = 0,703$, при $p < 0,05$; $y = 0,0135x + 31,095$), As ($R^2 = 0,817$, при $p < 0,05$) и Mo ($R^2 = 0,703$, $p < 0,05$).



Примечание – По оси абсцисс – расстояние (м), по оси ординат – содержание элемента в образцах сфагнума (мг/кг), горизонтальная штриховая линия обозначает содержание элемента в сфагнуме аэроловушек фоновой территории.

Рисунок 3 – Графики зависимостей между содержанием химических элементов в сфагнуме аэроловушек и расстоянием от источника техногенного загрязнения по юго-восточной трансекте (П1 – П5)

Также отмечается значительное ослабление аэральных эмиссий в точке П7 по сравнению с П6, что объясняется наличием между ними лесополосы, выполняющей роль «зеленого экрана». Известно, что крона растений может эффективно адсорбировать и уменьшать количество твердых частиц. Например, сосновый лес может поглотить около 36,4 т/га в год переносимой по воздуху пыли [14]. Поэтому применение лесозащитных полос и экранов является довольно эффективным методом, благодаря которому может улавливаться до половины выбрасываемых пылевых частиц [15].

Геохимический смысл выделения ассоциаций и обоснованность выводов подтверждают выбросы ТМ, приведенные на основании химического анализа золы свинцовой – основного продукта эмиссий аккумуляторного производства. Пыль, образующаяся в ходе технологических процессов, содержит очень высокие концентрации Sb, Ag, Bi, Pb, Cd, Sn, Ni, As и других элементов. Например, по данным [16], в технологической пыли одного из аккумуляторных заводов фиксировалась следующая ассоциация элементов (в скобках указаны средние значения коэффициента концентрации (Кс) относительно фоновых содержаний в почвах): Sb (5000), Ag (1000), Bi (670), Pb (380), Cd (330), Sn (190), Ni (75), As (46), Co (42), Cu (26), Zn (20), W (20), In (20), Tl (20).

Анализ распространения ТМ по двум направлениям выявил, что по юго-восточной трансекте в радиусе до 420 м от источника техногенных поллютантов при-

существует аэральное загрязнение Pb (коэффициент аномальности 317–1372), Sn (10–45), Cd (3–27), V (8–10), Ni (2,5 – 4), Sb (1,8 – 4,6), Mo (1,5 – 2,8).

За пределами санитарно-защитной зоны (СЗЗ) предприятия на расстоянии 1280 м (П5) по юго-восточной трансекте выявлено превышение фоновых значений только для трех ТМ: Ni – в 1,5 раза, Pb и V – примерно в 4 раза. По запад – юго-западному направлению в 590 м от источника техногенных поллютантов (П6) выявлено превышение фона для 4 ТМ: Pb (в 20 раз), V (в 13 раз), Ni (в 6 раз) и Mo (в 2 раза). В этом же направлении за пределами СЗЗ (П7, 840 м от источника) превышение фоновых значений сохраняется для Pb (в 17 раз), V (в 3 раза) и Ni (в 1,6 раза).

Таким образом, согласно полученным данным, обоснованность выделения СЗЗ по данным направлениям, совпадающим с преобладающими ветрами, требует уточнения. В целом в окружающую среду с атмосферными выбросами попадает 28–35 % от общего загрязнения Pb, 20–21 % Zn, 16–26 % Cd [17]. Основными источниками поступления ТМ в атмосферу являются промышленность (в первую очередь металлургия, нефтепереработка, электротехническое производство, производство и переработка аккумуляторных батарей), а также автотранспорт, котельные, мусоросжигающие установки и сельскохозяйственное производство [7]. Отмечено, что в процессе переработки (регенерации) аккумуляторов выделяется значительное количество пыли, которая содержит Pb, Sb, Sn, Cu, Fe, Cd, Zn, As и другие поллютанты, при этом некоторая часть пылевых частиц не улавливается промышленными фильтрами и попадает в атмосферу. Часть ТМ (в первую очередь Pb) подвергается восстановлению на предприятии с последующим включением в производственный цикл. Степень повторного использования во многом зависит от способа регенерации и технологического процесса [16].

Применение современных методов биоиндикации и физико-химического анализа позволяет выявить несоответствие действующих нормативов (ПДК и ОДК) реальному набору элементов, загрязняющих почву вокруг конкретных источников. Так, в исследованиях Д. В. Ладонина отмечается, что почвы в импактных зонах, вследствие аэрального поступления загрязнены значительно бóльшим набором химических элементов, чем это считалось ранее [18].

В выбросах и отходах белорусских предприятий по переработке свинецсодержащего сырья также содержатся значительные концентрации элементов Fe, Cu, Sn, Sb [16; 19], учет которых практически не ведется.

Заключение

Таким образом, усовершенствованная и апробированная нами методика анализа аэротехногенного загрязнения различного происхождения была эффективна для мониторинга атмосферного воздуха в импактных зонах промышленного предприятия и урбозкосистеме на содержание Pb, Cd, Sn, Sb, V, Ni, Mo и As. Преимуществами данного метода является накопительный характер биоиндикации, что позволяет выявить суммарные концентрации элементов, а не только их точечные или пиковые значения. Были выявлены значительные превышения фоновых значений в содержании Pb, Cd, Sb, Sn, Ni, Mo на территориях, прилегающих к промышленному предприятию по переработке аккумуляторных батарей, а также Pb, Ni, Sn – для центральной части урбозкосистемы.

Выявлены тенденции к накоплению мышьяка, кадмия, железа и некоторых других элементов на фоновых территориях. Были выделены 3 ассоциации элементов и определен их геохимический смысл. Предлагаемый нами подход может быть рекомендован как для рутинного локального экомониторинга различных источников аэро-

техногенных выбросов промышленно-энергетических узлов, в т. ч. в урбоэкосистемах, так и для отслеживания глобальных процессов, включая трансграничный перенос.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Air pollution monitoring using emission inventories combined with the moss bag approach / P. Iodice [et al.] // *The Science of the total environment*. – 2015. – Nr 541. – P. 1410–1419.
2. Atmospheric trace metal pollution in the Naples urban area based on results from moss and lichen bags / S. Giordano [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2005. – Vol. 136, iss 3. – P. 431–442.
3. Moss bag biomonitoring: A methodological review / A. Ares [et al.] // *The Science of the total environment*. – 2012. – Nr 432. – P. 143–158.
4. Анищенко, Л. Н. Опыт химической брיוиндикации состояния воздуха крупной урбо-экосистемы (на примере города Брянска) / Л. Н. Анищенко // *Бюллетень Брянского отделения РБО*. – 2015. – № 1 (5). – С. 64–70.
5. Инелова, З. А. Использование и особенности культивирования мха сфагнума в биотехнологической системе для естественной фильтрации, очистки воздуха в городских условиях / З. А. Инелова, А. Е. Ермаков, Д. Едилхан // *Вестник Карагандинского университета. Серия: Биология. Медицина. География*. – 2022. – № 3 (107). – С. 67–77.
6. Алексеенко, Ю. В. Брיוиндикация атмосферных выпадений металлов и металлоидов в Республике Беларусь : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 1.6.21 / Алексеенко Юлия Владимировна ; Калинингр. гос. ун-т. – Калининград, 2021. – 22 с.
7. Best options for the exposure of traditional and innovative moss bags: A systematic evaluation in three European countries / F. Capozzi [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2016. – Vol. 214. – P. 362–373.
8. Медведев, И. Ф. Тяжелые металлы в экосистемах / И. Ф. Медведев, С. С. Деревягин. – Саратов : Ракурс, 2017. – 178 с.
9. Williams, R. J. P. Evolution was chemically constrained / R. J. P. Williams, J. Da Silva // *Journal of Theoretical Biology*. – 2003. – Nr 220. – P. 323–343.
10. Оценки уровней загрязнения свинцом территории Беларуси с высоким пространственным разрешением ЕМЕП, 2016. – URL: https://www.msceast.org/reports/4_2016_russ.pdf (дата обращения: 12.05.2025).
11. Городская среда: геоэкологические аспекты : моногр. / В. С. Хомич [и др.]. – Мн. : Бел. навука, 2013. – 301 с.
12. Геохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв и огородных культур в урболандшафтах г. Бреста и разработка рекомендаций по снижению соответствующих рисков / ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси» ; рук. Михальчук Н. В. – Брест, 2017. – отчет ГРНТИ: 87.15.09 (№ ГР 20180040).
13. Содержание микроэлементов и структурные изменения хвои *Picea abies* (L.) Karst. в условиях городской среды / А. П. Колбас [и др.] // *Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі*. – 2010. – № 2. – С. 33–42.
14. Ecological compensation mechanism for urban green land and its application in Shanghai, China / Y. Wang [et al.] // *Front. Environ. Sci. Eng. China*. – 2007. – Vol. 1. – P. 320–324.
15. The spatial structures and the dust retention effects of green-land types in the workshop district of Wuhan Iron and Steel Company / Z. Zhou [et al.] // *Acta Ecol. Sin.* – 2001. – Vol. 22. – P. 2036–2040.
16. Ровин, С. Л. Исследование отходов, образующихся при производстве свинца / С. Л. Ровин, С. В. Григорьев // *Литье и металлургия*. – 2018. – № 2 (91). – С. 43–49.
17. Изменение подвижности тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах в зависимости от степени их гумусированности и применения высоких доз органических удобрений / В. А. Седых [и др.] // *Известия ТСХА*. – 2011. – Вып. 3. – С. 17–24.
18. Ладонин, Д. В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах / Д. В. Ладонин. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2019. – 312 с.
19. Оценка полиэлементного загрязнения некоторых субстратов и территорий в Брестском регионе / А. П. Колбас [и др.] // *Веснік Мозырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І. П. Шамякіна*. – 2021. – № 2 (58). – С. 21–31.

1. Air pollution monitoring using emission inventories combined with the moss bag approach / P. Iodice [et al.] // *The Science of the total environment*. – 2015. – Nr 541. – P. 1410–1419.
2. Atmospheric trace metal pollution in the Naples urban area based on results from moss and lichen bags / S. Giordano [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2005. – Vol. 136, iss. 3. – P. 431–442.
3. Moss bag biomonitoring: A methodological review / A. Ares [et al.] // *The Science of the total environment*. – 2012. – Nr 432. – P. 143–158.
4. Anishchenko, L. N. Opyt khimicheskoi briiindikatsii sostoyaniya vozdukha krupnoi urbo-ekosistemy (na primere goroda Bryanska) / L. N. Anishchenko // *Byulleten' Bryanskogo otdeleniya RBO*. – 2015. – № 1 (5). – S. 64–70.
5. Inelova, Z. A. Ispol'zovanie i osobennosti kul'tivirovaniya mkha sfagnuma v biotekhnologicheskoi sisteme dlya estestvennoi fil'tratsii, ochistki vozdukha v gorodskikh usloviyakh / Z. A. Inelova, A. Ye. Yermekov, D. Edilkhan // *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Meditsina. Geografiya*. – 2022. – № 3 (107). – S. 67–77.
6. Alekseenok, Yu. V. Briiindikatsiya atmosferykh vypadenii metallov i metalloidov v Respublike Belarus' : avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk : 1.6.21 / Alekseenok Yuliya Vladimirovna ; Kaliningr. gos. un-t. – Kaliningrad, 2021. – 22 s.
7. Best options for the exposure of traditional and innovative moss bags: A systematic evaluation in three European countries / F. Capozzi [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2016. – Vol. 214. – P. 362–373.
8. Medvedev, I. F. Tyazhelye metally v ekosistemakh / I. F. Medvedev, S. S. Derevyagin. – Saratov : Rakurs, 2017. – 178 s.
9. Williams, R. J. P. Evolution was chemically constrained / R. J. P. Williams, J. Da Silva // *Journal of Theoretical Biology*. – 2003. – Nr 220. – P. 323–343.
10. Otsenki urovnei zagryazneniya svintsom territorii Belarusi s vysokim prostranstvennym razresheniem EMEP, 2016. – URL: https://www.msceast.org/reports/4_2016_russ.pdf (data obrashcheniya: 12.05.2025).
11. Gorodskaya sreda: geoekologicheskie aspekty : monogr. / V. S. Khomich [i dr.]. – Mn. : Bel. navuka, 2013. – 301 s.
12. Geokhimicheskaya otsenka zagryazneniya tyazhelymi metallami pochv i ogorodnykh kul'tur v urbolandshaftakh g. Bresta i razrabotka rekomendatsii po snizheniyu sootvetstvuyushchikh riskov / GNU «Polesskii agrarno-ekologicheskii institut NAN Belarusi» ; ruk. Mikhal'chuk N. V. – Brest, 2017. – otchet GRNTI: 87.15.09 (№ GR 20180040).
13. Soderzhanie mikroelementov i strukturnye izmeneniya khvoi Picea abies (L.) Karst. v usloviyakh gorodskoi sredy / A. P. Kolbas [i dr.] // *Vesnik Brestskaga universiteta. Seriya. 5, Khimiya. Biologiya. Navuki ab Zyamli*. – 2010. – № 2. – C. 33–42.
14. Ecological compensation mechanism for urban green land and its application in Shanghai, China / Y. Wang [et al.] // *Front. Environ. Sci. Eng. China*. – 2007. – Vol. 1. – P. 320–324.
15. The spatial structures and the dust retention effects of green-land types in the workshop district of Wuhan Iron and Steel Company / Z. Zhou [et al.] // *Acta Ecol. Sin.* – 2001. – Vol. 22. – P. 2036–2040.
16. Rovin, S. L. Issledovanie otkhodov, obrazuyushchikhsya pri proizvodstve svintsy / S. L. Rovin, S. V. Grigor'ev // *Lit'e i metallurgiya*. – 2018. – № 2 (91). – S. 43–49.
17. Izmenenie podvizhnosti tyazhelykh metallov v dornovo-podzolistykh pochvakh v zavisimosti ot stepeni ikh gumusirovannosti i primeneniya vysokikh doz organicheskikh udobrenii / V. A. Sedykh [i dr.] // *Izvestiya TSKhA*. – 2011. – Vyp. 3. – S. 17–24.
18. Ladonin, D. V. Formy soedinenii tyazhelykh metallov v tekhnogenno-zagryaznennykh pochvakh / D. V. Ladonin. – M. : Izd-vo Mosk. un-ta, 2019. – 312 s.
19. Otsenka polielementnogo zagryazneniya nekotorykh substratov i territorii v Brestskom regione / A. P. Kolbas [i dr.] // *Vesnik Mozyrskaga dzyarzhavnaga pedagogichnaga universitehta imya I. P. Shamyakina*. – 2021. – № 2 (58). – S. 21–31.