ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
Научная статья
УДК 504.054
DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-117-132
EDN: LPGRAF

НАКОПЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВО МХАХ ГОРОДА ГУБАХИ

Евгения Леонидовна Гатина[1]✉, Инга Ивановна Зиньковская[2], Павел Юрьевич Санников[1], Валерия Вячеславовна Четыркина[1], Полина Владимировна Бронникова[1], Алина Васильевна Киршина[1]
[1] Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
[2] Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия
✉ suslovael@mail.ru, ORCID 0000-0002-4684-0465

Аннотация. В статье представлены результаты исследования атмосферных выпадений потенциально токсичных элементов (ПТЭ) на территории г. Губахи (Пермский край). Целью работы являлось определение содержания ПТЭ во мхах на территории одного из центров химической, топливно-энергетической, металлургической промышленности Пермского края – г. Губахи. Здесь расположены промышленные предприятия, отвалы закрытых шахт Кизеловского угольного бассейна, при этом территория является точкой развития спорта, туризма и рекреации в регионе. В 44 точках в пределах городской черты отобраны образцы мхов-биомониторов: плевроциума Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.) и гилокомицума блестящего (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.). На основе метода оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований в образцах мхов определены концентрации 16 ПТЭ. Установлено, что медианные концентрации (мг/кг) накапливаемых ПТЭ в Губахе снижаются в биогеохимическом ряду абсолютных содержаний: P (2003) > S (1493) > Fe (748,25) > Al (585) > Mn (215,65) >Zn (61,74) > Ba (46,28) > Sr (19,81) > Cu (6,94) > Pb (3,6) > Ni (2,35) > V (1,97) > Cr (1,84) > Co (0,5) > Cd (0,44) > Hg (0,032). Пространственное распределение полученных значений ПТЭ во мхах, а также результаты статистической обработки и факторного анализа свидетельствуют о вероятной взаимосвязи высоких концентраций Al, Fe, V, Cr, Co, Ni с выбросами предприятий органической химии. Повышенные значения Hg, S, Cu ассоциируются с выбросами предприятий по производству коксующихся углей. Полученные значения по Cd предположительно могут объясняться как естественными, так и техногенными причинами. Полученные данные представляют собой значимое дополнение качественной и количественной картины аэротехногенного загрязнения г. Губахи относительно классических сведений, получаемых от стационарных постов наблюдений за состоянием атмосферного воздуха.

Ключевые слова: мхи-биомониторы, загрязнение атмосферы, аэротехногенный перенос, тяжелые металлы, биоиндикация

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00160.

Для цитирования: Гатина Е. Л., Зиньковская И. И., Санников П. Ю., Четыркина В. В., Бронникова П. В., Киршина А. В. Накопление атмосферных выпадений потенциально токсичных элементов во мхах города Губахи // Географический вестник = Geographical bulletin. 2026. № 2(77). С. 117–132. EDN: LPGRAF DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-117-132

ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT
Original article
DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-117-132
EDN: LPGRAF

BIOACCUMULATION OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS ATMOSPHERIC DEPOSITION IN MOSSES OF THE TOWN OF GUBAKHA

Evgeniya L. Gatina[1]✉, Inga I. Zinicovscaia[2], Pavel Yu. Sannikov[1], Valeriya V. Chetyrkina[1], Polina V. Bronnikova[1], Alina V. Kirshina[1]
[1] Perm State University, Perm, Russia
[2] Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
✉ suslovael@mail.ru, ORCID 0000-0002-4684-0465

© Гатина Е. Л., Зиньковская И. И., Санников П. Ю., Четыркина В. В., Бронникова П. В., Киршина А. В., 2026

Лицензировано под CC BY 4.0. Чтобы посмотреть копию этой лицензии, посетите https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Abstract. The paper compares data on the accumulation of a number of potentially toxic elements (hereinafter – PTE) in mosses in the town of Gubakha, Perm Region. The aim of the work was to determine the content of PTE in mosses in the territory of Gubakha, one of the centers of chemical, fuel and energy, and metallurgical industry of Perm Krai. Industrial enterprises and dumps of closed mines of the Kizel (Kizelovsky) Coal Basin are located here; at the same time, the territory is a development point for sports, tourism, and recreation in the region. At the stage of field work, 44 samples of *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. and *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al. were collected in the afforested part of the town according to the *Moss survey protocol* standard methodology. The Frank Laboratory of Neutron Physics at the Joint Institute for Nuclear Research determined the concentrations of 16 PTEs in the moss samples. Median concentrations (mg/kg) of accumulated PTEs have been found to decrease in the following series: P (2003) > S (1493) > Fe (748.25) > Al (585) > Mn (215.65) >Zn (61.74) > Ba (46.28) > Sr (19.81) > Cu (6.94) > Pb (3.6) > Ni (2.35) > V (1.97) > Cr (1.84) > Co (0.5) > Cd (0.44) > Hg (0.032). The spatial distribution of the obtained PTE values in mosses, as well as the results of statistical and factor analysis, indicate a possible relationship between high concentrations of Al, Fe, V, Cr, Co, and Ni and emissions from organic chemistry enterprises. Increased values of Hg, S, and Cu are associated with emissions from coking coal production facilities. The values obtained for Cd are presumably due to both natural and anthropogenic causes. The obtained data significantly add to the qualitative and quantitative picture of aerotechnogenic pollution of Gubakha relative to the classical data received from permanent observation posts that monitor the state of atmospheric air in the built-up part of the town.

Keywords: biomonitor mosses, atmospheric pollution, aerotechnogenic transport, heavy metals, bioindication

Funding. Research is supported by the Russian Science Foundation Grant No. 25-27-00160.

For citation: Gatina E. L., Zinicovscaia I. I., Sannikov P. Yu., Chetyrkina V. V., Bronnikova P. V., Kirshina A. V. Bioaccumulation of potentially toxic elements atmospheric deposition in mosses of the town of Gubakha. *Geographical Bulletin*, 2026, no. 2(77), pp. 117–132. EDN: LPGRAF DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-117-132

Введение

В промышленно развитых регионах значительны атмосферные выпадения потенциально токсичных элементов (далее – ПТЭ). Количественная оценка выпадений ПТЭ является одной из важнейших задач охраны окружающей среды. В крупных городах для этих целей используются стационарные посты контроля качества атмосферного воздуха, ими отслеживаются не все ПТЭ. Альтернативой могут быть биомониторы. В качестве биомониторов в течение более 30 лет используются мхи. Главное их преимущество в том, что мхи поглощают питательные вещества непосредственно из атмосферных осаждений в концентрациях, сопоставимых с теми, что присутствуют в воздухе, дождевой воде, снежном покрове.

Исследования атмосферных выпадений ПТЭ во мхах проведены в Центральной России [54; 55], на островах Российского сектора Арктики [7], в республике Удмуртии [10], на Южном Урале [24], в Якутии [46], в Камчатском крае [31], в Беларуси [1], Молдове [59, 60], на Донбассе [11], на отдельных особо охраняемых природных территориях (Бузулукский бор [3]), в отдельных городах: г. Тихвин Ленинградской области [5], г. Пермь Пермского края [6; 40], Кемерово, Юрга, Березовский, Новокузнецк, Прокопьевск, Междуреченск Кемеровской области [61]. Значения ПТЭ, полученные во мхах-биомониторах, сопоставимы с данными стационарных постов наблюдения.

Город Губаха – один и промышленных центров Пермского края, где локализуются предприятия химической, топливно-энергетической, металлургической промышленности. Здесь расположено два стационарных поста контроля качества атмосферного воздуха.

В отличие от стационарных постов контроля качества атмосферного воздуха, мхи-биомониторы указывают на средневзвешенную концентрацию загрязнений воздуха за трехлетний период (2023–2025 гг.). Кроме того, они показывают степень загрязнения воздуха в различных частях города и прилегающих территорий. В ближайшие годы масштабные инвестиционные процессы запланированы в сфере спорта, туризма и рекреации в тех или иных частях г. Губахи [17]. Поэтому оценка качества атмосферного воздуха здесь остается актуальной.

Цель работы – географический анализ накопления ПТЭ во мхах на территории г. Губахи Пермского края.

Для ее достижения поставлены задачи:

– визуализировать накопление ПТЭ во мхах городских лесов г. Губахи Пермского края и сопоставить полученные данные с распределением промышленных объектов, железнодорожными и автомагистралями города;

– выявить вероятные источники загрязнения атмосферного воздуха соединениями ПТЭ;

– установить районы с наибольшим загрязнением атмосферы соединениями ПТЭ в 2023–2025 гг.

Материалы и методы

Краткая характеристика района исследования. Город Губаха расположен в восточной части Пермского края, в западных предгорьях Среднего Урала (рис. 1). К востоку от города проходит западноуральский хребет Рудянский спой. Местность холмисто-увалистая, предгорная, пересеченная долинами рек и ручьев с высотами до 496 м над у.м. Широко распространены карстовые явления: пещеры и провалы. Территория Губахи является зоной повышенного потенциала загрязнения атмосферы. Процессы рассеивания примесей в приземном слое атмосферы осложняются инверсиями, застойными явлениями, штилями и другими метеорологическими явлениями [32].

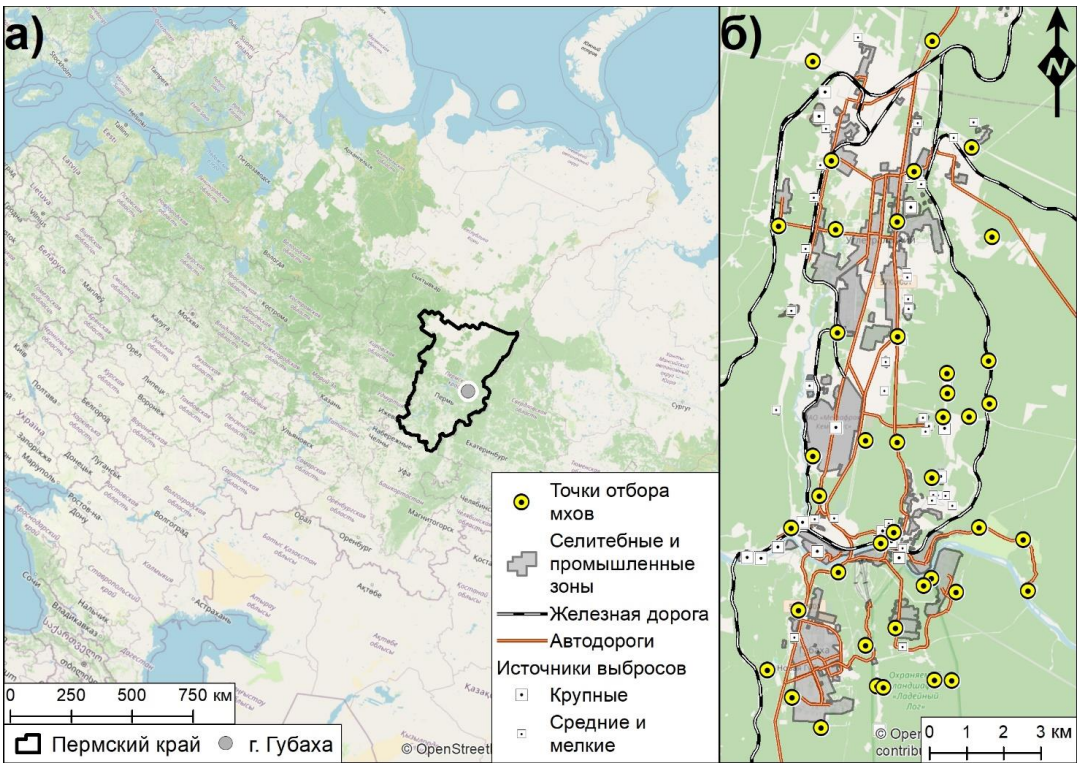


Рис. 1. Обзорная карта района исследования: а) Пермский край в европейской части России; б) источники выбросов Губахи и точки отбора образцов мхов-биомониторов

Fig. 1. Overview map of the study area: a) Perm Region in the European part of Russia; б) sources of technogenic emissions in the town of Gubakha and biomonitor mosses sampling points

Климат изучаемой территории – умеренно-континентальный. Средняя температура июня +17,2° С, января –14,2° С. Годовое количество осадков составляет 871 мм [4]. На территории г. Губахи преобладают ветры южного и юго-западного направления (рис. 2).

Город расположен в районе таежных предгорных лесов, где произрастают предгорные пихтово-еловые и елово-пихтовые леса, имеются вторичные березовые и смешанные леса вследствие интенсивных рубок. Преобладают подзолистые и дерново-подзолистые суглинистые почвы [2].

В структуре промышленного производства Губахи важное место занимают предприятия химической, топливно-энергетической, металлургической отраслей. Это ОАО «Губахинский кокс», ОАО «Метафракс Кемикалс».

Кроме того, здесь расположены отвалы шахт Кизеловского угольного бассейна (КУБ). Добыча угля на этой территории велась с конца XVIII в., но интенсивное развитие получила в 30-е гг. прошлого века. В период активной разработки в КУБе насчитывалось 37 шахт с ежегодной добычей около 12 млн т угля. По причине нерентабельности добычи в сложных горно-геологических условиях в 1997 г. началась ликвидация шахт, завершенная к 2002 г. Разработка месторождений угля сопровождалась образованием породных отвалов, в которых размещались обломки аргиллитов, песчаников, известняков с присутствием угля. Кроме того, в них встречается древесина, металлические предметы, строительный мусор. В 53 отвалах, занимающих более 300 га, складировано свыше 24 млн м^3 твердых отходов угледобычи. Установлена закономерность увеличения гамма-излучения породных отвалов с глубиной, обусловленная гипергенным переносом элементов из поверхностных слоев отвалов. Породы исследованных отвалов характеризуются допустимым уровнем удельной эффективной активности естественных радионуклидов с диапазоном 52–238 Бк/кг. Наибольшие значения удельной эффективной активности отмечены для отвалов шахты «Шумихинская» (до 238 Бк/кг) и шахты «им. 40-летия Октября» (до 221 Бк/кг) [18].

По данным на 2017 год, на территории предприятий г. Губахи находится 342 источника выбросов различной высоты. Из них 286 источников – на предприятиях, валовый выброс которых составляет 80–85 % от выбросов всех источников в городе [14].

Мониторинг загрязнения атмосферного воздуха в г. Губахе производится на двух стационарных постах по 23 показателям: взвешенные вещества, диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота, оксид азота, сероводород, фенол, аммиак, формальдегид, ароматические углеводороды (бензол, толуол, ксилолы, этилбензол), бенз(а)пирен, тяжелые металлы (Cr, Ni, Pb, Mn, Cu, Zn, Fe, Cd, Mg).

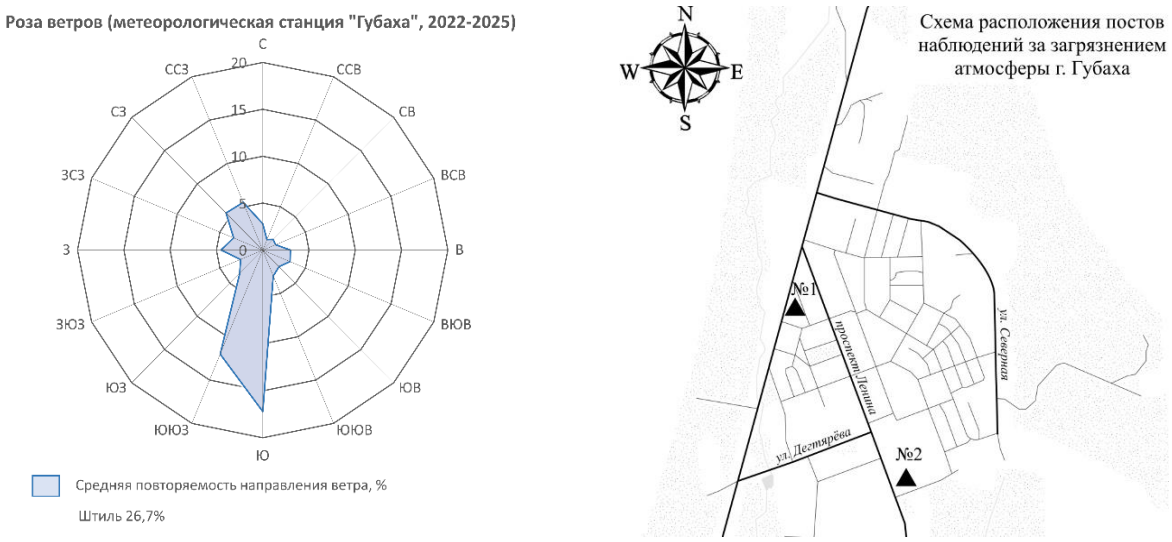


Рис. 2. Роза ветров и посты наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха в г. Губахе
Fig. 2. Wind rose and location of air pollution monitoring stations in the town of Gubakha

В 2024 году в Губахе отобрано и проанализировано 12 032 пробы атмосферного воздуха. Уровень загрязнения атмосферного воздуха – повышенный: стандартный индекс (СИ) = 2,1 (бенз(а)пирен), наибольшая повторяемость превышения ПДК (НП) = 0,4 % (формальдегид), индекс загрязнения атмосферы – повышенный. Общее количество превышений предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ за год – 13 случаев. Из них превышений максимальных разовых ПДК (ПДК м.р.) – 5 случаев. Среди тенденций загрязнения атмосферы за 2020–2024 гг. отмечается повышение средних концентраций сероводорода, формальдегида, тяжелых металлов (Mg, Cu, Ni, Zn), снижение средних концентраций взвешенных веществ, диоксида серы, оксида углерода, диоксида азота, фенола, аммиака, ароматических углеводородов (бензола, метилбензола, этилбензола), бенз(а)пирена и железа [23].

Сбор и первичная обработка проб. Отбор мхов-биомониторов проведен в июне 2025 г. в административных границах г. Губахи. Образцы собраны с 44 точек (рис. 1). Отбор проб листостебельных мхов осуществлялся в лесах различного типа: снытьевых, черничных, травянистых, папоротниковых, произрастающих преимущественно на дерново-подзолистых, каменистых почвах. В качестве модельных мхов приняты плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.) и гилокомицум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.). Оба вида рекомендованы для проведения исследований [48] и представлены в лесах вокруг г. Губахи. Количественно среди проб преобладал плевроциум Шребера.

Для определения элементного состава атмосферных выпадений отбирали зеленые и зелено-коричневые сегменты мхов, соответствующие трехлетнему приросту. Отобранные образцы очищали от постороннего мусора и остатков почвы.

Лабораторные анализы содержания ПТЭ во мхах

Определение элементного состава образцов мха проводили в лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне.

Для определения Hg образцы измельчались на механической мельнице с агатовыми стаканами, помещались в стеклянные тары и отправлялись сушиться при температуре 105° С до постоянной массы. Определение Hg проводилось в прямом анализаторе ртути DMA-80 Milestone.

Остальные элементы (Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, P, Pb, S, Sr, V, Zn) определяли методом оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС). На аналитических весах взвешивали 0,5 г мха и помещали в тефлоновый сосуд с 5 мл HNO_3 и 2 мл H_2O_2. Образцы минерализовали в микроволновой системе MARS6 (CEM, США). После минерализации растворы фильтровали через фильтровальную бумагу, переносили в калиброванные колбы емкостью 50 мл и доводили объем до метки деионизованной водой. Затем определяли содержание ПТЭ с помощью ИСП-ОЭС Plasmaquant PQ 9000 Elite (Analytik Jena, Германия).

Контроль качества анализа. Для контроля качества анализа использовали стандарт INCT-PVTL-6 (Polish Virginia Tobacco Leaves (Табачные листья)) [44].

Статистическая обработка. Статистическую обработку проводили с применением программ STATISTICA 10.

Фоновую концентрацию определяли путем нахождения среднего от трех минимальных значений по выборке. Подобный подхлод традиционно применяется в аналогичных исследованиях [46, 54].

Пространственный анализ полученных данных. Визуальное представление накопления ПТЭ во мхах выполняли при помощи геоинформационных методов (пакет программ ArcGIS). В ходе визуализации генеральная совокупность значений по каждому элементу была разделена на 7 классов (квантилей).

Результаты

В таблице представлены медианные, минимальные, максимальные и фоновые значения концентраций ПТЭ во мхах г. Губахи, а также аналогичные данные по Перми, Тверской области, Беларуси, Швеции.

Таблица
Table

Содержание потенциально токсичных элементов (мг/кг) в образцах мха г. Губахи и результаты некоторых аналогичных исследований, медиана (минимальное – максимальное значение)
Potentially toxic elements content (mg/kg) in moss samples from Gubakha and the results of some similar studies, median (spread of min–max values)

Элемент	*г. Губаха, фон*	*г. Губаха, 2025, n = 44*	*г. Пермь, 2023, n = 144 [40]*	*Тверская область, 2024, n = 144 [54]*	*Беларусь, 2021, n = 250 [1]*	*Швеция, 2021, n = 496 [41]*
Al	297,67	585 (258,4–6690)	1803 (564–9038)	414 (178,0–898)	740 (102–9200)	170 (740–54)
S	961,7	1493 (870,1–2617)	1601 (1009–4641)	1022 (744–1721)	–	–
P	929,43	2003 (893,3–2989)	2752 (1405–4042)	–	–	–
V	1,05	1,97 (1,01–19,99)	6,2 (2,12–24,28)	1,0 (0,49–2,5)	1,35 (0,3–9,57)	0,5 (0,1–9,1)
Cr	0,99	1,84 (0,93–11,38)	5,27 (2,07–15,57)	0,83 (0,45–2,40)	2,45 (0,18–11,6)	0,4 (0,1–45)
Mn	38,17	215,65 (27,11–753,2)	350 (50,99–3137)	417 (46–1137)	418 (43–1852)	–
Fe	339,2	748,25 (304,4–5416)	1685 (489,9–6088,0)	308 (180–705)	466 (110–2243)	170 (47–5400)
Co	0,25	0,5 (0,23–2,04)	1,12 (0,34–3,75)	0,26 (0,10–0,56)	0,349 (0,09–7,02)	–
Ni	1,11	2,35 (1,02–6,71)	–	–	–	0,5 (0,2–6)
Cu	4,36	6,94 (4,09–14,8)	10,94 (6,58–22,64)	4,7 (2,6–11,0)	5,47 (2,79–32,8)	3,6 (1,7–20)
Zn	34,6	61,74 (32,6–113,9)	60,19 (34,72–201,8)	38 (23–88)	37 (14–157)	36 (11–94)
Sr	9,03	19,81 (7,84–66,03)	32,8 (19,42–87,5)	15 (5,4–74)	11 (3,68–65)	–
Cd	0,19	0,44 (0,16–1,23)	0,22 (0,12–0,55)	0,21 (0,09–0,98)	0,33 (0,107–1,09)	0,1 (0–0,6)
Ba	14,99	46,28 (14,95–110,4)	72,8 (19,72–169,1)	30 (4,3–93)	21 (5–94)	–
Pb	1,99	3,6 (1,83–12,87)	5,69 (2,72–14,7)	2,7 (1,5–7,6)	2,72 (0,92–8,47)	1,0 (0,2–15)
Hg	0,02	0,032 (0,0175–0,0682)	0,039 (0,018–0,096)	0,037 (0,021–0,068)	–	0,0 (0–0,2)

Накопление ПТЭ во мхах г. Губахи показано на рис. 3 (Al, V, Cr, Fe, Co, Ni, Ba, Mn) и рис. 4 (S, Cu, Hg, Cd, Pb, Sr, Zn, P).

Обсуждение

Накопление ПТЭ во мхах г. Губахи и других городов и регионов. Для Губахи медианные концентрации (мг/кг) накапливаемых ПТЭ снижаются в биогеохимическом ряду абсолютных содержаний: P (2003) > S (1493) > Fe (748,25) > Al (585) > Mn (215,65) >Zn (61,74) > Ba (46,28) > Sr (19,81) > Cu (6,94) > Pb (3,6) > Ni (2,35) > V (1,97) > Cr (1,84) > Co (0,5) > Cd (0,44) > Hg (0,032).

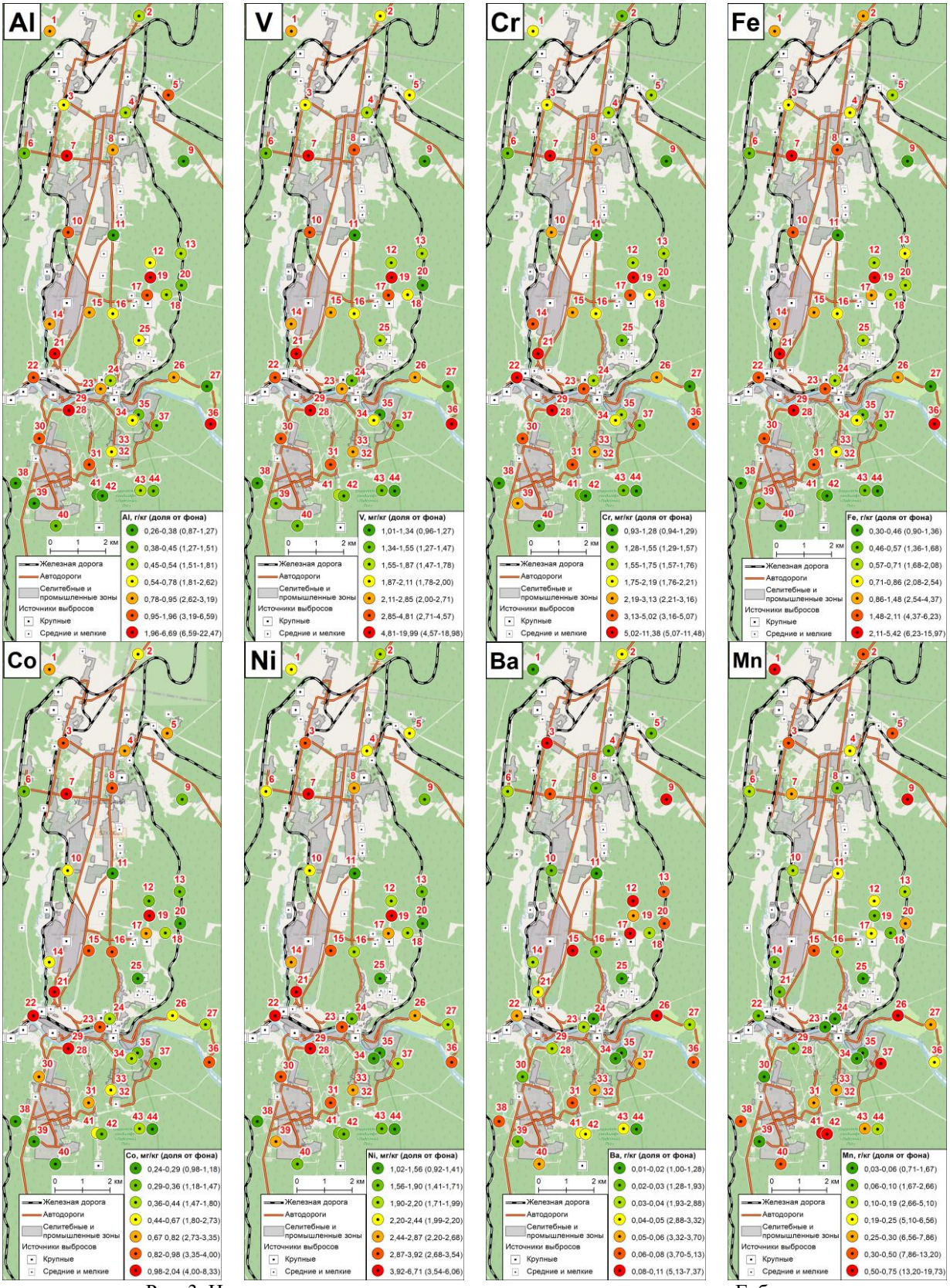


Рис. 3. Накопление потенциально токсичных элементов во мхах г. Губахи:
Al – алюминий, V – ванадий, Cr – хром, Fe – железо, Co – кобальт, Ni – никель, Ba – барий, Mn – марганец
Fig. 3. Accumulation of potentially toxic elements in mosses from the town of Gubakha:
Al – aluminum, V – vanadium, Cr – chromium, Fe – iron, Co – cobalt, Ni – nickel, Ba – barium, Mn – manganese

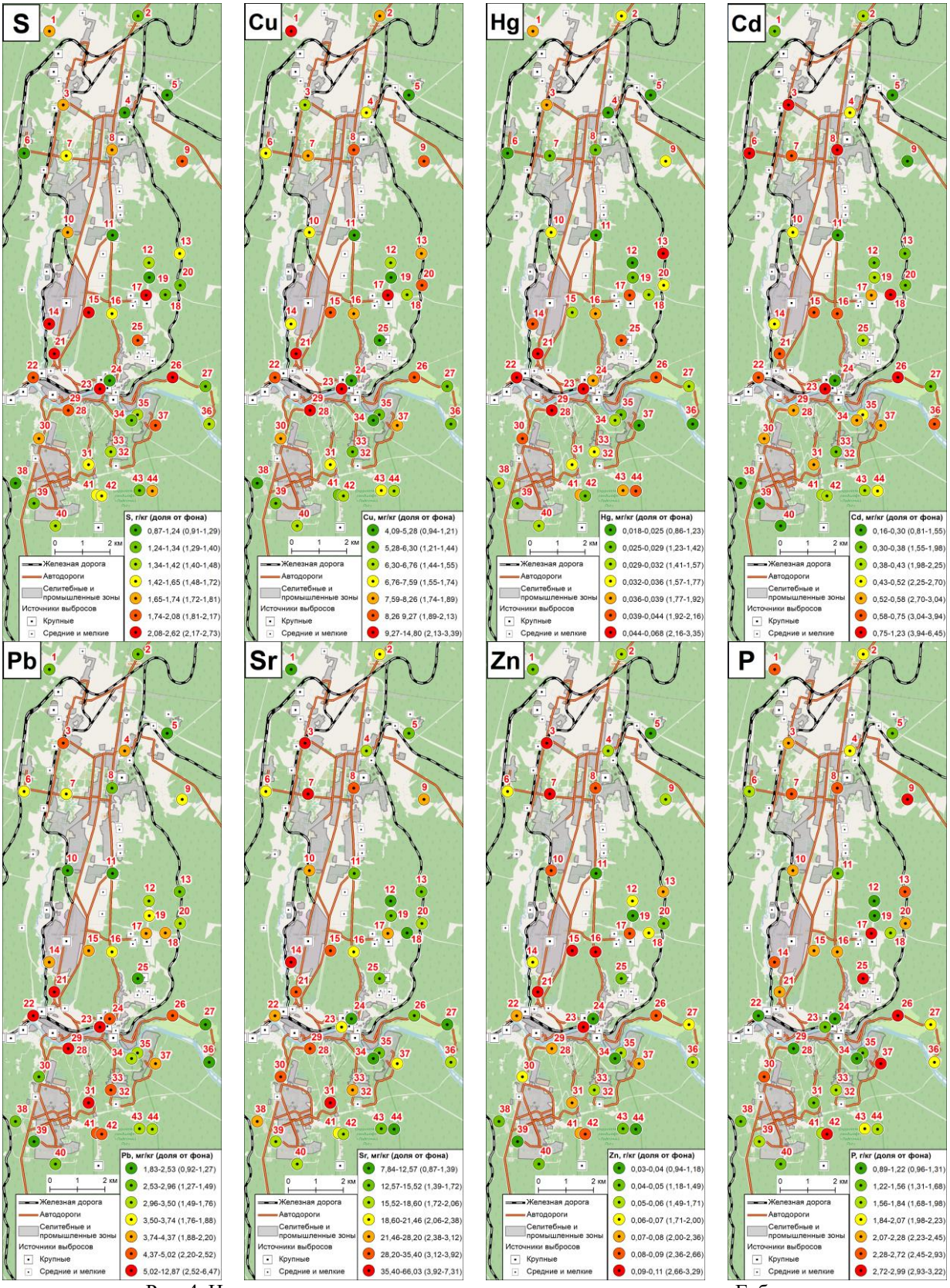


Рис. 4. Накопление потенциально токсичных элементов во мхах г. Губахи:
S – сера, Cu – медь, Hg – ртуть, Cd – кадмий, Pb – свинец, Sr – стронций, Zn – цинк, P – фосфор
Fig. 4. Accumulation of potentially toxic elements in mosses from the town of Gubakha:
S – sulfur, Cu – copper, Hg – mercury, Cd – cadmium, Pb – lead, Sr – strontium, Zn – zinc, P – phosphorus

P является важным элементом жизнедеятельности мхов. Ранее отмечалось, что *Pleurozium schreberi* обладает более высокой способностью поглощать P по сравнению с другими видами мхов [36, 45]. Прочие элементы, измеренные в образцах мхов, могут иметь как естественное, так и техногенное происхождение.

Для большинства ПТЭ медианные значения в образцах мхов Губахи ниже, чем таковые, отмеченные для ПТЭ, обнаруженных во мхах города Перми. Исключение составляет Cd, медианные значения которого в два раза превышают выявленные в Перми.

Если сравнивать полученные медианные значения ПТЭ с Тверской областью, Беларусью, Швецией, то по большинству элементов (Ba, Pb, Sr, Co, V) значения Губахи несколько выше значений в Тверской области и Беларуси и значительно выше значений в Швеции.

По Al и Cr значения ПТЭ Губахи выше данных по Тверской области, но ниже значений, определенных для Беларуси. Значения Mn во мхах Губахи и Перми значительно ниже данных, полученных с территорий Тверской области, Беларуси, Швеции.

Т. А. Сухаревой установлено, что в непосредственной близости от локального источника загрязнения (медно-никелевый комбинат) на стадии техногенного редколесья концентрации Ca, K, P, Mg, Mn во мхах существенно ниже фоновых показателей [25]. Подобные закономерности для марганца были отмечены нами для г. Перми [6].

Значение Fe во мхах в Губахе в два раза ниже, чем в Перми, при этом оба значения гораздо выше показателей, полученных в Тверской области, Беларуси, Швеции.

Сходные значения Zn и Hg, обнаруженные во мхах, установлены для Губахи и Перми.

Отдельно отметим, что на территории Перми для четырех элементов (Mn, S, Zn, Pb) максимальное значение в биогеохимическом ряду превышало предыдущее в два и более раз. Такие статистические экстремумы приходились на одну точку. Для Губахи подобные статистические экстремумы не отмечены, что характеризует распределение концентраций загрязняющих веществ во мхах как более равномерное.

Пространственное распределение выпадений ПТЭ г. Губахи и вероятные источники. Распределение **Al** по обследованной территории представлено на рис. 3–Al. Наибольшие значения отмечаются в долине р. Косьвы, вблизи авто- и железнодорожных магистралей. Известно, что небольшие количества Al могут выделяться в окружающую среду при сжигании угля. От различных видов углей в атмосферный воздух в виде летучей золы поступает от 5 до 35 % Al_2O_3 [8]. В долине реки Косьвы расположено одно из крупных предприятий г. Губахи – «Губахинский кокс». Это предприятие, специализирующееся на производстве металлургического, литейного кокса и химических продуктов из него. Используемая сырьевая база – кузбасский уголь. На промплощадке предприятия расположены открытые склады угля [22].

Схожая картина по распределению значений ПТЭ во мхах зафиксирована для **Fe** (рис. 3–Fe). Точки с максимальными концентрациями Fe, отнесенные к шестому и седьмому квантилям распределения, расположены в долине р. Косьвы, вблизи авто- и железнодорожных магистралей. Fe может попадать в атмосферу при сжигании ископаемого топлива и биомассы [41].

Так же как и для Перми, в Губахе отмечается близкое с Fe и Al распределение **V** (рис. 3–V). Повышенные значения сосредоточены на дне и склонах долины р. Косьвы и вблизи авто- и железнодорожных магистралей. Вероятными источниками поступления V в атмосферу являются отработанные газы бензиновых двигателей и выбросы теплоэлектростанций [51]. Известно, что в рекреационных зонах Москвы высокое содержание V отмечается в образцах мхов, находящихся в зоне влияния крупных загруженных автомагистралей [51]. Кроме того, V присутствует в топливных маслах всех типов двигателей [50].

Распределение **Cr** по обследованной территории представлено на рис. 3–Cr. К антропогенным источникам Cr относится горнодобывающая промышленность, а также сжигание угля, отходов в деревообрабатывающей и бумажной отраслях промышленности [41]. На территории Губахи значения Cr во мхах повышены в долине р. Косьвы, вблизи основных промышленных предприятий. Следует отметить, что по данным ICP Vegetation Coordination Centre сохраняется значительная неопределенность концентраций Cr во мхах. Так, в европейском регионе выбросы Cr за 30 лет сократились на 70,6 %. При этом соответствующее снижение концентрации Cr в тканях мхов составило лишь 37,2 % [41].

При распределении **Co** по исследуемой территории высокие значения зафиксированы во мхах, отобранных к востоку от промплощадки «Метафракс Кемикалс», в понижениях рельефа по долине р. Косьвы и на севере исследуемой территории (рис. 3–Co). По некоторым данным, Co ассоциируется с элементами геогенного происхождения [35; 60]. Кроме того, есть исследования, подтверждающие техногенное поступление Co в окружающую среду от сжигания угля, металлургической, химической промышленности (производство красок и катализаторов) [57; 58].

Распределение **Ni** по территории представлено на рис. 3–Ni. Точки с максимальными концентрациями Ni, отнесенные к шестому и седьмому квантилям распределения, отмечены в долине р. Косьвы, вблизи авто- и железных дорог, вокруг промплощадки ОАО «Метафракс Кемикалс», на севере исследуемой территории. По литературным данным, повышенные значения Ni фиксируются вблизи производственных объектов, перерабатывающих никельсодержащие руды [41]. Известно, что в никельсодержащей руде может содержаться и Co.

Все вышеперечисленные элементы (**Al, Fe, V, Cr, Co, Ni**) по результатам факторного анализа отнесены к фактору 1, составляющему 36 % общей дисперсии. Отметим очень высокие нагрузки (0,88–0,97) для всех этих шести ПТЭ. Сходство распределений Al, Fe, V, Cr наблюдается достаточно часто, корреляция этих элементов во мхах в отдельных случаях достигает 0,77 [39]. Наибольший вклад в фактор 1 внесли образцы из точек 7, 19, 28; чуть менее сильное влияние – образцы из точек 21, 29, 36. Поскольку все точки (за исключением 36) находятся поблизости от промышленной площадки «Метафракс Кемикалс», выбросы этого предприятия, вероятно, обеспечивают наибольший вклад в атмосферные выпадения Al, Fe, V, Cr, Co, Ni. На наблюдаемое пространственное распределение точек с высокой концентрацией этих ПТЭ, по-видимому, также оказывает влияние относительно высокая орографическая позиция производственной площадки предприятия и долинный эффект движения воздушных масс в условиях расчлененного предгорного рельефа. Значительное влияние на высокое содержание Al, Fe, V, Cr, Co, Ni во мхах в долине Косьвы (точки 22–23, 28–29) оказывает использование угля на ОАО «Губахинский кокс». Вероятно, высокое содержание ПТЭ этой группы в образцах из точек 19 и 17 связано с их близостью к отвалу из угольного шлака (15–30 м от точки 19), а также к полигонам свалок бытовых и производственных отходов (300–400 м от точки 17).

К фактору 2, составляющему 14 % общей дисперсии, отнесены **Ba** и **Mn**. Оба элемента играют важную роль в естественных биохимических процессах во мхах. Наличие этих ПТЭ во мхах обусловлено как гомеостазом, так и аккумуляцией атмосферных осаждений [1]. Высокие значения Ba и Mn (рис. 3–Ba, рис. 3–Mn), относящиеся к шестому-седьмому квантилям, отмечаются во всех частях исследуемой территории, при этом часто не совпадают друг с другом. Кроме того, такие точки находятся друг от друга на сравнительно больших расстояниях. Такая пространственная картина распределения выпадений Ba и Mn вряд ли может объясняться наличием одного или нескольких техногенных источников их поступления в атмосферу.

Среди точек с низкими значениями Mn (первый-второй квантили) обращает на себя внимание компактная зона в нижней части долины Косьвы (точки 21–23, 28–29), которая по восьми другим ПТЭ (Cr, Fe, Co, Ni, Hg, Cu, S, Pb) является наиболее загрязненной. Как в случаях с г. Мончегорском (комбинат «Североникель») [25] и в г. Перми [6], наблюдаемое в этом районе г. Губахи снижение содержания Mn может объясняться непосредственной близостью значительного техногенного источника – ОАО «Губахинский кокс».

Высокие содержания **Hg** (рис. 4–Hg) во мхах исследуемой территории отмечены на дне и склонах долины р. Косьвы и на востоке города (точки 13, 17, 25, 26). Установлено, что двумя крупнейшими современными источниками антропогенных выбросов Hg в окружающую среду в мире являются угольные электростанции, кустарная и мелкомасштабная добыча золота [43]. Для Южного Прибайкалья установлено, что на тепловых электростанциях улавливается около 40–50 % поступающей Hg, тогда как оставшиеся 50–60 % выбрасываются в атмосферу. Следовательно, значительная часть Hg, содержащейся в угле, попадает в воздушную среду, обусловливая загрязнение воздуха, вод, почв, растительности через атмосферные осадки [16; 30]. По данным ICP Vegetation Coordination Centre, концентрации Hg во мхах в целом однородны на большей части Европы, что, вероятно, объясняется длительным временем существования ртути в атмосфере [41].

Высокие значения концентраций **S** (рис. 4–S) во мхах приурочены к долине р. Косьвы, южной окраине промплощадки предприятия «Метафракс Кемикалс», а также отмечены на востоке территории (в точках 17, 25, 26). Традиционным источником серы может служить сжигание углей, нефти.

Для **Cu** отмечаются повышенные значения на дне и склонах долины р. Косьвы, а также в восточной части города в точках 17, 20, 26 (рис. 4–Cu). Cu присутствует в отработанных газах автомобильных двигателей и может поступать в воздух при истирании тормозных колодок. Для городского округа Лобня Московской области высокое содержание Cu отмечено в транспортных и промышленных зонах, а также в селитебных и рекреационных зонах, расположенных вблизи транспортных магистралей [12]. Для Перми ряд точек с высоким содержанием Cu отмечен вблизи железных дорог и крупного сортировочного пункта железнодорожного транспорта, а также рядом с автомагистралями [6].

Hg, S, Cu при факторном анализе отнесены к фактору 3, составляющему 18 % общей дисперсии. Нагрузки по этим элементам варьируют от 0,75 до 0,89. Основными антропогенными источниками этой группы ПТЭ являются сжигание топлива, использование нефтепродуктов, нефтепереработка [47; 49; 52]. Наиболее выраженный вклад в фактор 3 оказали значения Hg, S, Cu в образцах из точек 21–23 и 28–29, которые пространственно сгруппированы в компактную зону на дне и склонах долины р. Косьвы вблизи главного автомобильного и железнодорожного мостов. Во всех этих точках значения высокие и отнесены к шестому и седьмому квантилям распределения. Такое положение в пространстве указывает на то, что наиболее вероятным источником выбросов Hg, S, Cu является предприятие «Губахинский кокс». Здесь выстроен полный цикл производства коксующихся углей и сопутствующих химических продуктов. Технология коксохимического производства известна высокими ртуть- и серосодержащими (сероводород) выбросами [19; 21; 26; 28; 29; 33].

Точки 17, 25, 26 соседствуют с группой карьеров известняка, где добыча продолжается или уже завершена. Возможно, высокое содержание этой группы ПТЭ в образцах из точек 17, 25, 26 как-то связано с дефляцией с открытых поверхностей карьеров, хотя связь известняка с Hg, S, Cu остается неясной.

Обращает на себя внимание содержание во мхах исследуемой территории **Cd** (рис. 4– Cd). Этот элемент единственный отнесен к фактору 4, составляющему 12 % общей дисперсии. Известно, что большая часть

загрязнения Cd окружающей среды вызвана захоронением и сжиганием загрязненных кадмием отходов, использованием минеральных, в частности фосфорных, удобрений. Для урбанизированных территорий важным источником Cd является транспорт [27; 41]. Известны повышенные концентрации Cd в угледобывающих районах [34]. В частности, в границах Кизеловского угольного бассейна, куда входит и Губаха, выявлены высокие содержания Cd в техногенных почвах угольных отвалов – 2,7–6,9 мг/кг [20]. Как уже отмечалось выше, медианное значение Cd (0,44 мг/кг) в Губахе значительно выше аналогичных значений в г. Перми (0,22), Тверской области (0,21), Беларуси (0,33), Швеции (0,1). Пространственное распределение высоких значений Cd в г. Губахе не позволяет однозначно связать выпадения этого элемента с каким-либо техногенным источником, в том числе с влиянием автотранспорта и/или вторичным техногенным загрязнением в результате выветривания угольных отвалов. Два вышеперечисленных обстоятельства позволяют осторожно предполагать, что значимый вклад в выпадения Cd в Губахе также дают естественные поступления из недр Земли. По некоторым данным [38], геогенный Cd образуется в результате естественных геологических процессов, в первую очередь выветривания осадочных пород, вулканической активности, гидротермальных источников. Из перечисленных случаев только первый потенциально может быть характерен для Губахи. В пользу этой версии говорит и наличие так называемой Косьвинской техногенно-природной геохимической аномалии [13], где отмечено содержание Cd в почвах в 10–80 раз выше ОДК, а также предгорное положение города, отличающее ее от остальных сравниваемых территорий. В целом же однозначная интерпретация наблюдаемого распределения выпадений Cd пока затруднена.

Последние четыре ПТЭ – **Pb, Sr, Zn, P** – не вошли ни в один из факторов. При этом на их распределение приходятся оставшиеся 20 % дисперсии. Кратко рассмотрим пространственные распределения выпадений этих элементов по отдельности.

Компактный ареал высоких значении **Pb** (так же как и ПТЭ, отнесенных к фактору 3 (S, Cu, Hg)) отмечен на дне и склонах долины р. Косьвы, вблизи коксохимического производства (рис. 4–Pb). Вероятно, интенсивные выпадения Pb и его накопление во мхах тоже связаны с технологией коксохимического производства. Также вероятной причиной может быть содержание токсических элементов в углях различных марок [15].

Пространственное распределение повышенного содержания во мхах **Sr, Zn** напоминает аналогичные распределения элементов фактора 1, связываемого с выбросами «Метафракс Кемикалс» (рис. 4–Sr, 4–Zn).

Выпадения **Sr** могут быть ассоциированы как с предприятиями органического синтеза [9], так и с выбросами дизельных двигателей автомобилей и тепловозов [56]. Поступление **Zn** в атмосферу обычно связывают с процессами гальванизации (50 %) производства автомобильных шин (20 %), литья под давлением (17 %), производства латуни (17 %), а также изготовления плитки, керамики, стекла [42]. Распределение высоких значений **Sr** и **Zn** близко друг к другу (точки 3, 7, 15, 21), хотя есть и отличия (высокие значения Sr в точке 31 и Zn в точке 23). Так или иначе наличие и сила связи распределения выпадений Sr, Zn с техногенным источником (источниками (?)) пока остается неясной.

Высокие значения накопления **P** во мхах характерны для зоны точек 17, 25, 26 (рис. 4–P). Как ранее отмечалось, эти точки соседствуют с несколькими карьерами известняка. Фосфор нередко содержится в самом известняке в качестве примеси. Кроме того, залежи известняка часто граничат или переслаиваются с апатитами с высоким содержанием P. Предположительно, высокое содержание P обусловлено дефляцией с открытых поверхностей карьеров известняка.

Выводы

Для Губахи медианные концентрации (мг/кг) накапливаемых ПТЭ снижаются в биогеохимическом ряду абсолютных содержаний: P (2003) > S (1493) > Fe (748,25) > Al (585) > Mn (215,65) >Zn (61,74) > Ba (46,28) > Sr (19,81) > Cu (6,94) > Pb (3,6) > Ni (2,35) > V (1,97) > Cr (1,84) > Co (0,5) > Cd (0,44) > Hg (0,032).

Пространственное распределение выпадений и результаты статистической обработки (общая статистика и факторный анализ) указывают на взаимосвязь высоких концентраций Al, Fe, V, Cr, Co, Ni с выбросами предприятия «Метафракс Кемикалс»; а также повышенных значений Hg, S, Cu с выбросами предприятия «Губахинский кокс». Вероятней всего, эмиссии, образующиеся при производстве коксующихся углей, также являются основной причиной наблюдаемых повышенных концентраций Pb.

Наоборот, низкие значения Mn на дне и склонах долины р. Косьвы (между главным автомобильным и железнодорожным мостами) обусловлены непосредственной близостью мощного локального источника выбросов коксохимического производства.

Ощутимо высокий медианный уровень Cd (0,44 мг/кг), а также пики в его пространственном распределении предположительно могут объясняться как естественными (геогенное поступление), так и техногенными (и от первичных, и от вторичных источников) причинами.

Высокие значения накопления P во мхах на востоке правобережной части, по-видимому, обусловлены дефляцией с открытых поверхностей карьеров известняка.

Накопление ПТЭ во мхах-биомониторах позволило получить независимую (от классических режимных наблюдений на стационарных постах гидрометеорологической службы) оценку атмосферных выпадений ПТЭ в г. Губахе за 2023–2025 гг.

Библиографический список

1. *Алексеенок Ю. В.* Брионидикация атмосферных выпадений металлов и металлоидов в Республике Беларусь: дис. ... канд. геогр. наук / Балтийский федеральный университет им. Канта. Калининград, 2022. 194 с. EDN: WKFYSV

2. Атлас Пермского края / под общ.ред. А. М. Тартаковского. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2012. 124 с.

3. *Богданова Я. А., Прохорова Н. В., Вергель К. Н., Фронтасьева М. В.* Особенности накопления тяжелых металлов и металлоидов в фитомассе бокоплодного мха Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt. в условиях Красносамарского лесного массива (Самарская область) и Национального парка «Бузулукский бор» (Оренбургская область) // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11, № 1. С. 24–30. DOI: 10.55355/snv2022111101 EDN: QQKDGZ

4. *Булыгина О. Н., Веселов В. М., Разуваев В. Н., Александрова Т. М.* Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 : сайт. URL: http://meteo.ru/wp-content/uploads/2024/02/Свидетельство_Основные_метеорологические_сроки_№_2014620549.pdf (дата обращения: 20.11.2025)

5. *Вергель К. Н., Горяйнова З. И., Вихрова И. В., Фронтасьева М. В.* Метод мхов-биомониторов и ГИС-технологии в оценке воздушных загрязнений промышленными предприятиями Тихвинского района Ленинградской области // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 2. С. 92–101. EDN: SLTXEJ

6. *Гатина Е. Л., Санников П. Ю., Четыркина В. В.* Накопление атмосферных выпадений потенциально токсичных элементов во мхах города Перми // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 2(73). С. 141–153. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-2-141-153 EDN: TVOFCU

7. *Горбунов А. В., Ляпунов С. М., Ермолаев Б. В.* Распределение ртути в природных и урбанизированных средах Карелии // Экология человека. 2019. № 4. С. 10–17. DOI: 10.33396/1728-0869-2019-4-10-17 EDN: ZDDDQL

8. *Дмитриенко М. А., Няшина Г. С., Шлегель Н. Е., Шевырев С. А.* Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий // Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 3-4. С. 41–52. EDN: ZBTIYH

9. *Ермаков В. В.* Стронций в биосфере. Новосибирск: Академиздат, 2023. 168 с.

10. *Журавлева А. Н., Бухарина И. Л., Свозилик В., Фронтасьева М. В., Загребин Е. А.* Мониторинг следовых элементов на территории Удмуртской Республики методом нейтронного активационного анализа // Лесной вестник. 2022. Т. 26, № 3. С. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-54-61 EDN: AREZZH

11. *Зиньковская И. И., Вергель К. Н., Кравцова А. В., Сафонов А. И.* Биомониторинговая программа по оценке воздуха в Донбассе с помощью нейтронно- активационного анализа // Донецкие чтения 2022: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: мат. VII междунар. науч. конф., посвященной 85-летию Донецкого национального университета (Донецк, 27–28 октября 2022 г.). Донецк: Донецкий национальный университет, 2022. С. 69–71.

12. *Каманина И. З., Каплина С. П., Иванова А. А., Анисимова О. В.* Использование мхов для оценки состояния атмосферного воздуха городского округа Лобня // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 8. С. 99–112. DOI: 10.17076/eco2057 EDN: BUNIZT

13. *Копылов И. С.* Закономерности формирования почвенных ландшафтов Приуралья, их геохимические особенности и аномалии // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 395. EDN: ROFXZP

14. *Костарева Т. В., Кичигина Л. С., Тяпкина И. А.* Определение комплекса неблагоприятных метеоусловий для отдельных групп источников (на примере города Губаха, Пермский край) // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2017. № 585. С. 158–169. EDN: ZBMWJP

15. *Крылов Д. А.* «Токсичность» угольной тепло-электрогенерации // Горная Промышленность. 2016. № 5(129). С. 66–71. EDN: XBJKSX

16. *Луцкин Е. С., Хуриганова О. И.* Ртуть в снежном покрове городов Южного Прибайкалья // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: мат. III Всерос. науч. конф. (Москва, 15–17 ноября 2023 г.). М., 2023. С. 151–155. EDN: JOTPRO

17. *Лучников А. С., Лядова А. А., Меркушев С. А., Николаев Р. С.* Горное Прикамье: современные функциональные трансформации в муниципальных образованиях // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2023. Т. 87, № 7. С. 992–1004. DOI: 10.31857/S2587556623070105 EDN: HEQWXN

18. *Меньшикова Е. А., Блинов С. М., Перевощиков Р. Д.* Естественные радионуклиды в отвалах Кизеловского угольного бассейна // Экологические проблемы. Взгляд в будущее: сборник трудов IX междунар. науч.-практ. конф. (Ростов-на-Дону, 22–23 октября 2020 г.). Таганрог: Южный федеральный университет, 2020. С. 433–437. EDN: ULAQWN

19. *Мещурова Т. А*. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в городах Пермского края // Вестник НВГУ. 2020. № 1. С. 110–119. DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/17 EDN: PEEQCU

20. *Митракова Н. В., Хайрулина Е.А., Перевощикова А. А., Порошина Н. В.* Экогеохимическая оценка техногенных почв в районах складирования отходов добычи угля натерритории Кизеловского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2026. Т. 337, № 1. С. 98–112. DOI: 10.18799/24131830/2026/1/5008 EDN: IXRMQS

21. *Новикова В. Д., Таловская А. В., Язиков Е. Г.* Динамика пылевой нагрузки и химического состава снегового покрова в районе расположения предприятий теплоэнергетики и коксохимии (на примере г. Кемерово) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336, № 3. С. 193–207. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4984 EDN: ZXBXJJ

22. О предприятии. Губахинский кокс : сайт. URL: https://gkoksugol.ru/about (дата обращения: 20.02.26)

23. О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2024 году. Управление по охране окружающей среды Министерства природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края. Пермь, 2024. 236 с.

24. *Смирнов Л. И., Фронтасьева М. В., Стейннес Э., Ляпунов С. М., Черчинцев В. Д., Романов С. А., Самосадный В. Т.* Многомерный статистический анализ концентраций тяжелых металлов и радионуклидов во мхах и почве Южного Урала // Атомная энергия. 2004. Т. 97, № 1. С. 68–74. EDN: PDHPNV

25. *Сухарева Т. А.* Элементный состав зеленых мхов фоновых и техногенно-нарушенных территорий // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2018. № 3(172). С. 89–96. DOI: 10.15393/uchz.art.2018.130 EDN: YUDFWO

26. *Торопов Л. И.* Загрязнение атмосферы городов Пермского края // Вестник Пермского университета. Серия: Химия. 2012. № 1(5). С. 77–85. EDN: OZHXFF

27. *Фазлыева А. С., Даукаев Р. А., Каримов Д. О.* Влияние кадмия на здоровье населения и способы профилактики его токсических эффектов // Медицина труда и экология человека. 2022. № 1(29). С. 220–235. DOI: 10.24411/2411-3794-2022-10115 EDN: GLPABT

28. *Хайрулин С. Р., Исмагилов З. Р., Пармон В. Н., Кузнецов В. В., Батуев Р. А., Трясунов Б. Г., Теряева Т. Н., Мазгаров А. М., Вильданов А. Ф., Голованов А. Н., Гараиев А. М., Берсенев А. И.* Методы очистки коксового газа от сероводорода. Процессы утилизации H_2S. Прямое каталитическое окисление. Разработки института катализа со РАН (обзор) // Альтернативная энергетика и экология. 2014 (а). № 19(159). С. 86–106.

29. *Хайрулин С. Р., Пармон В. Н., Кузнецов В. В., Батуев Р. А., Трясунов Б. Г., Теряева Т. Н., Мазгаров А. М.,Вильданов А. Ф., Голованов А. Н., Гараиев А. М., Берсенев А. И., Исмагилов З. Р.* Методы очистки коксового газа от сероводорода. Процессы утилизации H_2S. Прямое каталитичекое окисление. Разработки института катализа со РАН // Альтернативная энергетика и экология. 2014 (б). № 2. С. 144–146.

30. *Хомченко О. С., Новороцкая А. Г.* Ртуть в снежном покрове Хабаровска // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. № 3. С. 349–357. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-3-349-358 EDN: UAVVSF

31. *Чернягина О. А., Зиньковская И. И., Юшин Н. С.* Активный биомониторинг в оценке влияния пеплопадов на загрязнение воздуха // Вулканизм и связанные с ним процессы: мат. XXVII ежегодной науч. конф., посвященной Дню вулканолога (Петропавловск-Камчатский, 27–29 марта 2024 г.). Петропавловск-Камчатский: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2024. С. 332–335. EDN KRCMZZ

32. *Шкляев В. А., Шкляева Л. С.* Климатические ресурсы Уральского Прикамья // Географический вестник. 2006. № 2(4). С. 97–110. EDN: NCSGNH

33. *Янин Е. П.* Ртуть в России: производство и потребление. М.: ИМГРЭ, 2004. 38 с. EDN: QQGHPT

34. *Barn P., Gombojav E., Ochir C., Boldbaatar B., Beejin B., Naidan G., Galsuren J., Legtseg B., Byambaa T., Hutcheon J. A., Janes C., Janssen P. A., Lanphear B. P., McCandless L. C., Takaro T. K., Venners S. A., Webster G. M., Palmer C. D., Parsons P. J., Allen R. W.* Coal smoke, gestational cadmium exposure, and fetal growth // Environmental Research. 2019. No. 179. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108830 EDN: MTRHYW

35. C*haligava O., Zinicovscaia I., Peshkova A., Yushin N., Frontasyeva M., Vergel K., Nurkassimova M., Cepoi L.* Major and Trace Airborne Elements and Ecological Risk Assessment: Georgia Moss Survey 2019–2023 // Plants. 2024. Vol. 13, No. 23. P. 3298. DOI: 10.3390/plants13233298 EDN: LUSEEZ

36. *Chapin F. S., Oechel W. C., Van Cleve K., Lawrence W.* The role of mosses in the phosphorus cycling of an Alaskan black spruce forest // Oecologi. 1987. No. 74(2). P. 310–315. DOI: 10.1007/BF00379375 EDN: LGHANL

37. *Chen L. C., Maciejczyk P., Thurston G. D.* Metals and air pollution // In Handbook on the Toxicology of Metals: Volume I: General Considerations. Academic Press. 2021. P. 137–182. DOI: 10.1016/B978-0-12-823292-7.00004-8 EDN: XZNOJK

38. *Duan Y., Yang Zh., Yu T., Yang Q., Liu X., Ji W., Jiang H., Zhuo X., Wu T., Qin J., Wang L.* Geogenic cadmium pollution in multi-medians caused by black shales in Luzhai, Guangxi // Environmental Pollution. 2020. Vol. 260. P. 113905. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113905 EDN: VVZTRP

39. *Frontasyeva M., Harmens H., Uzhinskiy A., Chaligava, O. and participants of the moss survey*. Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond. Report of the ICP Vegetation Moss Survey Coordination Centre. Joint Institute for Nuclear Research, UK Centre for Ecology & Hydrology. 2020. 136 p.

40. *Gatina E., Zinicovscaia I., Yushin N., Chaligava O., Frontasyeva M., Sharipova A.* Assessment of the Atmospheric Deposition of Potentially Toxic Elements Using Moss *Pleurozium schreberi* in an Urban Area: The Perm (Perm Region, Russia) Case Study // Plants. 2024. Vol. 13. DOI: 10.3390/plants13172353 EDN: HSVPBB

41. *Hayes F., Sharps K. and participants of the moss survey*. Mosses as biomonitors of air pollution: 2020/2021 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond // Report of the ICP Vegetation Coordination Centre. UK, 2025.

42. *Jones F., Bankiewicz D., Hupa M.* Occurrence and sources of zinc in fuels // Fuel. 2014. Vol. 117, Part A. P. 763–775 DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.005 EDN: SPGSNT

43. *Keane S., Bernaudat L., Davis K. J., Stylo M., Mutemeri N., Singo P., Twala P., Mutemeri I., Nakafeero A., Dossou Etui I.* Mercury and artisanal and small-scale gold mining: review of global use estimates and considerations for promoting mercury-free alternatives // Ambio. 2023. Vol. 52, No. 5. P. 833–852. DOI: 10.1007/s13280-023-01843-2 EDN: PMNDMY

44. Labmix24: Polish Virginia Tobacco Leaves : website. URL: https://labmix24.com/en/products/IC-INCT-PVTL-6 (дата обращения: 05.03.2024)

45. *Liu X., Wang Z., Li X., Bao W.* Nitrogen and phosphorus translocation of forest floor mosses as affected by a pulse of these nutrients // Journal of Plant Ecology. 2020. No. 13(5). P. 633–640. DOI: 10.1093/jpe/rtaa050 EDN: DFKEMI

46. *Mamaeva S., Frontasyeva M., Petrova K., Kolodeznikov V., Ignatyeva G., Zakharov E., Kononov V.* Assessment of the Area of Heavy Metals and Radionuclides Deposition on the Environment of the Household Waste Landfill on the 9th km of Vilyuisky Tract in Yakutsk City // Atmosphere. 2025. Vol. 16, No. 7. P. 816. DOI: 10.3390/atmos16070816 EDN: NKNLIU

47. *Maxhuni A., Lazo P., Kane S., Qarri F., Marku E., Harmens H.* First survey of atmospheric heavy metal deposition in Kosovo using moss biomonitoring // Environmental Science and Pollution Research. 2015. P. 744–755.

48. Moss survey protocol : website. URL: https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/moss-survey (дата обращения: 07.11.2024)

49. *Rehman M., Liu L., Wang Q., Saleem M.H., Bashir S., Ullah S., Peng D.* Copper environmental toxicology, recent advances, and future outlook: a review // Environmental Science and Pollution Research. Springer Verlag. 2019. DOI: 10.1007/s11356-019-05073-6 EDN: XIWUQM

50. *Shafer M. M., Toner B. M., Overdier J. T., Schauer J. J., Fakra S. C., Hu S., Herner J. D., Ayala A.* Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols // Environmental Science and Technology. 2012. No. 46(1). P. 189–195. DOI: 10.1021/es200463c

51. *Shvetsova M. S., Kamanina I. Z., Zinicovscaia I., Frontasyeva M. V., Pavlov S. S., Yushin N. S.* Active moss biomonitoring of airborne potentially toxic elements in recreational areas of Moscow // Environmental Monitoring and Assessment. 2024. Vol. 196. DOI: 10.1007/s10661-023-12210-9 EDN: QVUZNI

52. *Sun Y., Han Z., Du Z., Li Z., Cong X.* Preparation and performance of environmental friendly Sulphur-Free propellant for fireworks // Applied Thermal Engineering. 2017. No. 126. P. 987–996. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.003

53. United Nations Economic Commission for Europe International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops : website. URL: http://icpvegetation.ceh.ac.uk/ (дата обращения: 20.02.2025)

54. *Vergel K., Zinicovscaia I., Yushin N., Chaligava O., Cepoi L., Kravtsova A.* Moss Biomonitoring in the Evaluation of Air Pollution in the Tver Region, Russia // Atmosphere. 2024. Vol. 15. P. 1191. DOI: 10.3390/atmos15101191 EDN: MBRZDN

55. *Vergel K., Zinicovscaia I., Yushin N., Chaligava O., Nekhoroshkov P., Grozdov D.* Moss Biomonitoring of Atmospheric Pollution with Trace Elements in the Moscow Region, Russia // Toxics. 2022. Vol. 10. P. 66. DOI: 10.3390/toxics10020066 EDN: AIJILK

56. *Viskup R., Wolf C., Baumgartner W.* Identification of the Minor Chemical Elements in the Particulate Matter Exhaust Emissions From In-Use Diesel Engine Passenger Vehicles // Diesel and Gasoline Engines. IntechOpen. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.90760

57. *Wahlqvist F., Bryngelsson I. L., Westberg H., Vihlborg P., Andersson L.* Dermal and inhalable cobalt exposure – Uptake of cobalt for workers at Swedish hard metal plants // PLoS ONE. 2020. No. 15(8). DOI: 10.1371/journal.pone.0237100 EDN: CGZAFR

58. *Wu L., Isley C. F., Handley H. K., Taylor M. P.* Atmospheric sources of anthropogenic and geogenic trace metals in Australian lichen and fungi // Anthropocene. 2021. Vol. 33. DOI: 10.1016/j.ancene.2021.100279 EDN: URVBYI

59. *Zinicovscaia I., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Hramco C.* Moss biomonitoring of atmospheric trace element pollution in the Republic of Moldova // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2022. No. 82(3). P. 355–366. DOI: 10.1007/s00244-022-00918-7 EDN: MMSNDM

60. *Zinicovscaia I., Hramco C., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Duca G.* Accumulation of potentially toxic elements in mosses collected in the Republic of Moldova // Plants. 2021. Vol. 10, No. 3. P. 1–13. DOI: 10.3390/plants10030471 EDN: CPOORW

61. *Zinicovscaia I., Yushin N., Peshkova A. Noskov M., Koshelev V., Nosov D., Maksimova B., Dyakova A., Apanasevich P., Dmitrieva E.* Application of active biomonitoring technique for the assessment of air pollution by potentially toxic elements in urban areas in the Kemerovo Region, Russia // Environmental Monitoring and Assessment. 2025. Vol. 197, No. 2. P. 158. DOI: 10.1007/s10661-024-13439-8 EDN: EDLULT

References

1. Alekseenok Yu. V. *Brioindikatsiya atmosfernykh vypadenii metallov i metalloidov v Respublike Belarus'* [Brioindication of atmospheric precipitation of metals and metalloids in the Republic of Belarus]. C.Sc. dissertation, Immanuil Kant Baltic Federal University. Kaliningrad, 2022. 194 p. (In Russ.)

2. *Atlas Permskogo kraya* [Atlas of the Perm Region]. Ed. by. A. M. Tartakovskii. Perm State University. Perm, 2012. 124 p. (In Russ.)

3. Bogdanova Ya. A., Prokhorova N. V., Vergel K. N., Frontasyeva M. V. The features of heavy metals and metalloids accumulation in the phytomass of the amphipodous moss Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt. in the conditions of the Krasnosamarsky Forest area (Samara Region) and the National Park «Buzuluksky Bor» (Orenburg Region). *Samara Journal of Science*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 24–30. DOI: 10.55355/snv2022111101 (In Russ.)

4. *Bulygina O. N., Veselov V. M., Razuvaev V. N., Aleksandrova T. M. Opisanie massiva srochnykh dannykh ob osnovnykh meteorologicheskikh parametrakh na stantsiyakh Rossii: Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2014620549* [Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations: Certificate of State Registration of the Database No. 2014620549]. (In Russ.) URL: http://meteo.ru/wp-content/uploads/2024/02/Свидетельство_Основные_метеорологические_сроки_№_2014620549.pdf (Accessed 20 November 2025)

5. Vergel' K. N., Goryainova Z. I., Vikhrova I. V., Frontas'eva M. V. Metod mkhov-biomonitorov i GIS-tekhnologii v otsenke vozdushnykh zagryaznenii promyshlennymi predpriyatiyami Tikhvinskogo raiona Leningradskoi oblasti [The moss biomonitoring and GIS technology in the assessment of air pollution by industrial enterprises in Tikhvin district of Leningrad Region]. *Ekologiya urbanizirovannykh territorii*, 2014, no 2, pp. 92–101. (In Russ.)

6. Gatina E. L., Sannikov P. Yu., Chetyrkina V. V. Bioaccumulation of potentially toxic ele-ments in mosses resulting from atmospheric deposition (a case study of the city of Perm). *Geographical Bulletin*, 2025, no 2(73), pp. 141–153. (In Russ.) DOI: 10.17072/2079-7877-2025-2-141-153. EDN: TVOFCU

7. Gorbunov A. V., Lyapunov S. M., Ermolaev B. V. Distribution of mercury in natural and urban environments of Karelia, northwest Russia. *Human ecology*. 2019. №. 4. С. 10–17. (In Russ.) DOI: 10.33396/1728-0869-2019-4-10-17

8. Dmitrienko M. A., Nyashina G. S., Shlegel' N. E., Shevyrev S. A. Snizhenie antropogennykh vybrosov pri szhiganii uglei i otkhodov ikh pererabotki v kachestve komponentov organovodougol'nykh suspenzii [Reduction of anthropogenic emissions during the combustion of coal and its processing waste as components of organo-water-coal suspensions]. *Problemy energetiki*. 2017, vol. 19, no. 3-4, pp. 41–52. (In Russ.)

9. Ermakov V. V. *Strontsii v biosphere* [Strontium in the biosphere]. Novosibirsk: Akademizdat, 2023. 168 p. (In Russ.)

10. Zhuravleva A. N., Bukharina I. L., Svozilik V., Frontasyeva M. V., Zagrebin E. A. Trace elements monitoring in Udmurt Republic by neutron activation analysis. *Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no 3, pp. 54–61. (In Russ.) DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-54-61

11. Zin'kovskaya I. I., Vergel' K. N., Kravtsova A. V., Safonov A. I. Biomonitoringovaya programma po otsenke vozdukha v Donbasse s pomoshch'yu neitronno- aktivatsionnogo analiza [Biomonitoring program for assessing air quality in Donbas using neutron activation analysis]. In *Donetskie chteniya 2022: obrazovanie, nauka, innovatsii, kul'tura i vyzovy sovremennosti: Mater. VII Mezhdunar. nauch. konf., posvyashchennoi 85-letiyu Donetskogo natsional'nogo universiteta (Donetsk, 27–28 oktyabrya 2022 g.)*. Donetsk: Donetskii natsional'nyi universitet, 2022, pp. 69–71. (In Russ.)

12. Kamanina I. Z., Kaplina S. P., Ivanova A. A., Anisimova O. V. Using mosses to assess the state of atmospheric air in the Lobnya Urban District. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025, no 8, pp. 99–112. (In Russ.) DOI: 10.17076/eco2057

13. Kopylov I. S. Zakonomernosti formirovaniya pochvennykh landshaftov Priural'ya, ikh geokhimicheskie osobennosti i anomalii [Regularities of formation of soil landscapes of the Priurals, their geochemical features and anomalies]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no 4, pp. 395. (In Russ.)

14. Kostareva T. V., Kichigina L. S., Tyapkina I. A. Opredelenie kompleksa neblagopriyatnykh meteouslovii dlya otdel'nykh grupp istochnikov (na primere goroda Gubakha, Permskii krai) [Determination of a complex of unfavorable weather conditions for individual groups of sources (using the example of the city of Gubakha, Perm Region)]. *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, 2017, no 585, pp. 158–169. (In Russ.)

15. Krylov D. A. «Toksichnost'» ugol'noi teploelektrogeneratsii [The "toxicity" of coal-fired thermal power generation], Gornaya Promyshlennost', 2016, no. 5(129), pp. 66–71. (In Russ.)

16. Lutskin E. S., Khuriganova O. I. Rtut' v snezhnom pokrove gorodov Yuzhnogo Pribaikal'ya [Mercury in the snow cover of the cities of the Southern Baikal Region]. In *Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy: materialy III Vseros. nauch. konf. (Moskva, 15–17 noyabrya 2023 g.).* Moscow, 2023, pp. 151–155. . (In Russ.)

17. Luchnikov A. S., Lyadova A. A., Merkushev S. A., Nikolaev R. S. Mountainous Part of Perm Krai (Gornoe Prikamie): Modern Functional Transformations in Municipalities. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 7. C. 992–1004. (In Russ.) DOI: 10.31857/S2587556623070105

18. Men'shikova E. A., Blinov S. M., Perevoshchikov R. D. Estestvennye radionuklidy v otvalakh Kizelovskogo ugol'nogo basseina [Natural radionuclides in the waste dumps of the Kizelovsky coal basin]. In *Ekologicheskie problemy. Vzglyad v budushchee: sbornik trudov IX Mezhdun. nauch.-prakt. konfer. (Rostov-na-Donu, 22–23 oktyabrya 2020 g.).* Taganrog: Yuzhnyi federal'nyi universitet, 2020. C. 433–437. (In Russ.)

19. Meshchurova T. A. Assessment of air pollution in the cities of Perm region. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2020, no. 1, pp. 110–119. (In Russ.) DOI: 10.36906/2311-4444/20-1/17

20. Mitrakova N. V., Khayrulina E. A., Perevoshchikova A. A., Poroshina N. V. Ecogeochemical assessment of technogenic soils in areas of coal mining waste storage within the Kizel Coal Basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assest Engineering*, 2026, vol. 337, no 1, pp. 98–112. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2026/1/5008

21. Novikova V. D., Talovskaya A. V., Yazikov E. G. Dynamics of particulate load and chemical composition of snow cover in the area of thermal power and coke chemistry enterprises (case for the city of Kemerovo). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3. C. 193–207. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4984

22. . O predpriyatii. Gubakhinskii koks [About the enterprise. Gubakhinsky coke]. (In Russ.) URL: https://gkoksugol.ru/about (Accessed 20.02.26).

23. *O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Permskogo kraya v 2024 godu* [On the state and environmental protection of the Perm Territory in 2024.]. Upravlenie po okhrane okruzhayushchei sredy Ministerstva prirodnykh resursov, lesnogo khozyaistva i ekologii Permskogo kraya. Perm', 2024. 236 p. (In Russ.)

24. Smirnov L. I., Frontas'eva M. V., Steinnes E., Lyapunov S. M., Cherchintsev V. D., Romanov S. A., Samosadnyi V. T. Mnogomernyi statisticheskii analiz kontsentratsii tyazhelykh metallov i radionuklidov vo mkhakh i pochve Yuzhnogo Urala [Multivariate statistical analysis of concentrations of heavy metals and radionuclides in mosses and soil of the Southern Urals]. *Atomnaya energiya*, 2004, vol. 97, no. 1, pp. 68–74. (In Russ.)

25. Sukhareva T. A. Elementnyi sostav zelenykh mkhov fonovykh i tekhnogenno-narushennykh territorii [Elemental composition of green mosses of background and technogenic disturbed territories]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, no. 3(172), pp. 89–96. (In Russ.)

26. Toropov L. I. Zagryaznenie atmosfery gorodov Permskogo kraya [Air pollution of the cities of the Perm Territory]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Khimiya*, 2012, no. 1(5), p. 77–85. (In Russ.)

27. Fazlieva A.S., Daukaev R.A., Karimov D.O. Influence of cadmium on population health and methods for preventing its toxic effects. *Occupational health and human ecology*, 2022, no. 1(29), pp. 220–235. (In Russ.) DOI: 10.24411/2411-3794-2022-10115

28. Khairulin S. R., Ismagilov Z. R., Parmon V. N., Kuznetsov V. V., Batuev R. A., Tryasunov B. G., Teryaeva T. N., Mazgarov A. M., Vil'danov A. F., Golovanov A. N., Garaiev A. M., Bersenev A. I. Metody ochistki koksovogo gaza ot serovodoroda. Protsessy utilizatsii H_2S. Pryamoe kataliticheckoe okislenie. Razrabotki instituta kataliza so RAN (obzor) [Methods of coke gas purification from hydrogen sulfide. H_2S disposal processes. Direct catalytic oxidation. Developments of the Institute of Catalysis with the Russian Academy of Sciences (review)]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, 2014(a), no. 19(159), pp. 86–106. (In Russ.)

29. Khairulin S. R., Parmon V. N., Kuznetsov V. V., Batuev R. A., Tryasunov B. G., Teryaeva T. N., Mazgarov A. M.,Vil'danov A. F., Golovanov A. N., Garaiev A. M., Bersenev A. I., Ismagilov Z. R. Metody ochistki koksovogo gaza ot serovodoroda. Protsessy utilizatsii H_2S. Pryamoe katalitichekoe okislenie. Razrabotki instituta kataliza so RAN [Methods of coke gas purification from hydrogen sulfide. H_2S disposal processes. Direct catalytic oxidation. Development of the Institute of Catalysis with the Russian Academy of Sciences]. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya, 2014(б), no. 2. pp. 144–146. (In Russ.)

30. Khomchenko OS, Novorotskaya AG. Mercury concentration in the snow cover of the city of Khabarovsk. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2023, no. 3. pp. 349–357. (In Russ.) DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-3-349-358

31. Chernyagina O. A., Zin'kovskaya I. I., Yushin N. S. Aktivnyi biomonitoring v otsenke vliyaniya peplopadov na zagryaznenie vozdukha [Active biomonitoring in assessing the impact of ash falls on air pollution]. In *Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy: Materialy XXVII ezhegodnoi nauch. konfer., posvyashchennoi Dnyu vulkanologa (Petropavlovsk-Kamchatskii, 27–29 marta 2024 g.)*. Petropavlovsk-Kamchatskii: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie nauki Institut vulkanologii i seismologii DVO RAN, 2024. C. 332–335. EDN KRCMZZ (In Russ.)

32. Shklyaev V. A., Shklyaeva L. S. Klimaticheskie resursy Ural'skogo Prikam'ya [Climatic resources of the Ural Kama region]. *Geographical Bulletin*. 2006, no. 2(4), pp. 97–110. (In Russ.)

33. Yanin E. P. *Rtut' v Rossii: proizvodstvo i potreblenie* [Mercury in Russia: production and consumption]. Moscow: IMGRE, 2004, 38 p.

34. Barn P., Gombojav E., Ochir C., Boldbaatar B., Beejin B., Naidan G., Galsuren J., Legtseg B., Byambaa T., Hutcheon J. A., Janes C., Janssen P. A., Lanphear B. P., McCandless L. C., Takaro T. K., Venners S. A., Webster G. M., Palmer C. D., Parsons P. J., Allen R. W. Coal smoke, gestational cadmium exposure, and fetal growth. *Environmental Research*, 2019, no. 179, DOI: 10.1016/j.envres.2019.108830

35. Chaligava O., Zinicovscaia I., Peshkova A., Yushin N., Frontasyeva M., Vergel K., Nurkassimova M., Cepoi L. Major and Trace Airborne Elements and Ecological Risk Assessment: Georgia Moss Survey 2019–2023. *Plants*, 2024, vol. 13, no. 23, pp. 3298. DOI: 10.3390/plants13233298

36. Chapin F. S., Oechel W. C., Van Cleve K., Lawrence W. The role of mosses in the phosphorus cycling of an Alaskan black spruce forest. *Oecologi*, 1987, no. 74(2), pp. 310–315. DOI: 10.1007/BF00379375

37. Chen L. C., Maciejczyk P., Thurston G. D. Metals and air pollution. In *Handbook on the Toxicology of Metals: Volume I*: General Considerations. Academic Press, 2021, pp. 137–182. DOI: 10.1016/B978-0-12-823292-7.00004-8

38. Duan Y., Yang Zh., Yu T., Yang Q., Liu X., Ji W., Jiang H., Zhuo X., Wu T., Qin J., Wang L. Geogenic cadmium pollution in multi-medians caused by black shales in Luzhai, Guangxi. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 260, pp. 113905, DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113905

39. Frontasyeva M., Harmens H., Uzhinskiy A., Chaligava, O. and participants of the moss survey. *Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond. Report of the ICP Vegetation Moss Survey Coordination Centre*. Joint Institute for Nuclear Research, UK Centre for Ecology & Hydrology, 2020, 136 p.

40. Gatina E., Zinicovscaia I., Yushin N., Chaligava O., Frontasyeva M., Sharipova A. Assessment of the Atmospheric Deposition of Potentially Toxic Elements Using Moss *Pleurozium schreberi* in an Urban Area: The Perm (Perm Region, Russia) Case Study. *Plants*. 2024, vol. 13, DOI: 10.3390/plants13172353

41. Hayes F., Sharps K. and participants of the moss survey. *Mosses as biomonitors of air pollution: 2020/2021 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond*. Report of the ICP Vegetation Coordination Centre, UK, 2025.

42. Jones F., Bankiewicz D., Hupa M. Occurrence and sources of zinc in fuels. *Fuel*, 2014, vol. 117, part A, pp. 763–775 DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.005

43. Keane S., Bernaudat L., Davis K. J., Stylo M., Mutemeri N., Singo P., Twala P., Mutemeri I., Nakafeero A., Dossou Etui I. Mercury and artisanal and small-scale gold mining: review of global use estimates and considerations for promoting mercury-free alternatives. *Ambio*, 2023, vol. 52, no 5, pp. 833–852. DOI: 10.1007/s13280-023-01843-2

44. *Labmix24: Polish Virginia Tobacco Leaves*. URL: https://labmix24.com/en/products/IC-INCT-PVTL-6 (Accessed 5 March 2024)

45. Liu X., Wang Z., Li X., Bao W. Nitrogen and phosphorus translocation of forest floor mosses as affected by a pulse of these nutrients. *Journal of Plant Ecology*, 2020, no. 13(5), pp. 633–640. DOI: 10.1093/jpe/rtaa050

46. Mamaeva S., Frontasyeva M., Petrova K., Kolodeznikov V., Ignatyeva G., Zakharov E., Kononov V. Assessment of the Area of Heavy Metals and Radionuclides Deposition on the Environment of the Household Waste Landfill on the 9th km of Vilyuisky Tract in Yakutsk City. *Atmosphere*, 2025, vol. 16, no. 7, pp. 816. DOI: 10.3390/atmos16070816. EDN: NKNLIU

47. Maxhuni A., Lazo P., Kane S., Qarri F., Marku E., Harmens H. First survey of atmospheric heavy metal deposition in Kosovo using moss biomonitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, pp. 744–755.

48. *Moss survey protocol*. URL: https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/moss-survey (Accessed 07 November 2024).

49. Rehman M., Liu L., Wang Q., Saleem M.H., Bashir S., Ullah S., Peng D. Copper environmental toxicology, recent advances, and future outlook: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. Springer Verlag, 2019. DOI: 10.1007/s11356-019-05073-6

50. Shafer M. M., Toner B. M., Overdier J. T., Schauer J. J., Fakra S. C., Hu S., Herner J. D., Ayala A. Chemical speciation of vanadium in particulate matter emitted from diesel vehicles and urban atmospheric aerosols. *Environmental Science and Technology*, 2012, no. 46(1), pp. 189–195. DOI: 10.1021/es200463c

51. Shvetsova M. S., Kamanina I. Z., Zinicovscaia I., Frontasyeva M. V., Pavlov S. S., Yushin N. S. Active moss biomonitoring of airborne potentially toxic elements in recreational areas of Moscow. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, vol. 196(1), p. 81. DOI: 10.1007/s10661-023-12210-9

52. Sun Y., Han Z., Du Z., Li Z., Cong X. Preparation and performance of environmental friendly Sulphur-Free propellant for fireworks. *Applied Thermal Engineering*, 2017, no. 126, pp. 987–996. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.003

53. *United Nations Economic Commission for Europe International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops*. URL: http://icpvegetation.ceh.ac.uk/ (Accessed 20 February 2025).

54. Vergel K., Zinicovscaia I., Yushin N., Chaligava O., Cepoi L., Kravtsova A. Moss Biomonitoring in the Evaluation of Air Pollution in the Tver Region, Russia. *Atmosphere*, 2024, vol. 15, p. 1191. DOI: 10.3390/atmos15101191

55. Vergel K., Zinicovscaia I., Yushin N., Chaligava O., Nekhoroshkov P., Grozdov D. Moss Biomonitoring of Atmospheric Pollution with Trace Elements in the Moscow Region, Russia. *Toxics*. 2022, vol. 10, p. 66. DOI: 10.3390/toxics10020066

56. Viskup R., Wolf C., Baumgartner W. Identification of the Minor Chemical Elements in the Particulate Matter Exhaust Emissions From In-Use Diesel Engine Passenger Vehicles. *Diesel and Gasoline Engines. IntechOpen*, 2020, DOI: 10.5772/intechopen.90760

57. Wahlqvist F., Bryngelsson I. L., Westberg H., Vihlborg P., Andersson L. Dermal and inhalable cobalt exposure – Uptake of cobalt for workers at Swedish hard metal plants. *PLoS ONE*, 2020, no. 15(8). DOI: 10.1371/journal.pone.0237100

58. Wu L., Isley C. F., Handley H. K., Taylor M. P. Atmospheric sources of anthropogenic and geogenic trace metals in Australian lichen and fungi. *Anthropocene*, 2021, vol. 33. DOI: 10.1016/j.ancene.2021.100279

59. Zinicovscaia I., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Hramco C. Moss biomonitoring of atmospheric trace element pollution in the Republic of Moldova. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, no. 82(3), pp. 355–366. DOI: 10.1007/s00244-022-00918-7

60. Zinicovscaia I., Hramco C., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Duca G. Accumulation of potentially toxic elements in mosses collected in the Republic of Moldova. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 1–13. DOI: 10.3390/plants10030471.

61. Zinicovscaia I., Yushin N., Peshkova A. Noskov M., Koshelev V., Nosov D., Maksimova B., Dyakova A., Apanasevich P., Dmitrieva E. Application of active biomonitoring technique for the assessment of air pollution by potentially toxic elements in urban areas in the Kemerovo Region, Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, vol. 197, no. 2, pp. 158. DOI: 10.1007/s10661-024-13439-8. EDN: EDLULT

Статья поступила в редакцию: 10.11.25, одобрена после рецензирования: 28.02.26, принята к опубликованию: 11.06.26.

The article was submitted: 10 November 2025; approved after review: 28 February 2026; accepted for publication: 11 June 2026.

Информация об авторах
Евгения Леонидовна Гатина
Кандидат биологических наук,
доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы,
Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15

Information about the authors
Evgeniya L. Gatina
Candidate of Biological Sciences,
Associate Professor, Department of Biogeocenology
and Nature Conservation,
Perm State University;
15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: suslovael@mail.ru

Инга Ивановна Зиньковская
Доктор химических наук,
начальник сектора нейтронного активационного
анализа и прикладных исследований, лаборатория
нейтронной физики им. И. М. Франка,
Объединенный институт ядерных исследований;
141980, Россия, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Inga I. Zinicovscaia
Doctor of Chemical Sciences,
Head of the Sector of Neutron Activation Analysis and
Applied Research, Frank Laboratory of Neutron
Physics, Joint Institute for Nuclear Research;
6, Zholio-Kyuri st., Dubna, 141980, Russia

e-mail: zinikovskaia@mail.ru

Павел Юрьевич Санников
Кандидат географических наук,
доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы,
заведующий лабораторией эколого-
геоинформационных систем,
Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15

Pavel Yu. Sannikov
Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor, Department of Biogeocenology
and Nature Protection,
Head of the Laboratory of Ecological and
Geoinformation Systems,
Perm State University;
15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: sol1430@gmail.com

Валерия Вячеславовна Четыркина
Студент, Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15

Valeriya V. Chetyrkina
Student, Faculty of Geography,
Perm State University;
15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: lera.rrr16@gmail.com

Полина Владимировна Бронникова
Студент, Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15

Polina V. Bronnikova
Student, Faculty of Geography,
Perm State University;
15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: bronnyaaaaa@mail.ru

Алина Васильевна Киршина
Студент, Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15

Alina V. Kirshina
Student, Faculty of Geography,
Perm State University;
15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: alin.kirsh@gmail.com

Вклад авторов

Гатина Е. Л. – идея, постановка задач исследования, организация полевых работ, обработка материала, написание статьи, редактирование статьи.

Зиньковская И. И. – статистическая обработка, написание статьи, редактирование статьи.

Санников П. Ю. – сбор материала, обработка материала, работа с ГИС, создание карт, написание статьи, редактирование статьи.

Четыркина В. В. – обработка материала, создание карт, написание статьи.

Бронникова П. В. – сбор материала, обработка материала.

Киршина А. В. – сбор материала, обработка материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Evgeniya L. Gatina – the idea; setting of the research objectives; arrangement of field work; processing of the material; writing and editing of the article.

Inga I. Zinicovscaia – statistical processing; writing and editing of the article.

Pavel Yu. Sannikov – data collection; processing of the material; work with GIS; creation of the maps; writing and editing of the article.

Valeriya V. Chetyrkina – processing of the material; creation of the maps; writing of the article.

Polina V. Bronnikova – data collection; processing of the material.

Alina V. Kirshina – data collection; processing of the material.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.