

Научная статья
УДК 504.054
doi: 10.17072/2079-7877-2025-2-141-153
EDN: TVOFCU



НАКОПЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВО МХАХ ГОРОДА ПЕРМИ

Евгения Леонидовна Гатина¹, Павел Юрьевич Санников², Валерия Вячеславовна Четыркина³

^{1, 2, 3} Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

¹ suslovael@mail.ru

² sol1430@gmail.com

³ lera.rrr16@gmail.com

Аннотация. В статье проведено сравнение данных о накоплении ряда потенциально токсичных элементов (далее ПТЭ) во мхах и о расположении основных техногенных источников выбросов крупного транспортного узла и индустриального центра – г. Перми. На этапе полевых работ, согласно стандартной методике по отбору мхов Moss survey protocol, в обследованной части города было отобрано 144 образца *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. и *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 мха определены концентрации 15 ПТЭ: Al, Fe, V, Cr, Cu, Pb, S, Zn, Cd, Co, Sr, Mn, Ba, P, Hg. Пространственный анализ выполнялся средствами ГИС. Медианные значения концентраций Al, Fe, V, накопленные во мхах Перми, наряду с Удмуртией и Южным Уралом, заметно выше, чем тот же показатель среди остальных обследованных территорий. В отношении Mn отмечена противоположная тенденция. Вероятно, это обусловлено выраженным металлургическим, машиностроительным профилем регионов Урала, а также наличием производств, связанных с переработкой металлов. Установлено, что медианные концентрации (мг/кг) накапливаемых ПТЭ снижаются в биогеохимическом ряду абсолютных содержаний: Al (1803,00) > Fe (1685,00) > Mn (350,00) > Ba (72,8) > Zn (60,19) > Sr (32,80) > Cu (10,94) > V (6,20) > Pb (5,69) > Cr (5,27) > Co (1,12) > Cd (0,22) > Hg (0,039). Основными вероятными источниками загрязнения атмосферы г. Перми следует считать нефтеперерабатывающие, химические, металлообрабатывающие, машиностроительные предприятия, а также выбросы автотранспорта и объекты железнодорожной инфраструктуры. Полученные данные представляют собой значимое дополнение качественной и количественной картины аэротехногенного загрязнения Перми, относительно классических сведений, получаемых от стационарных постов наблюдений за состоянием атмосферного воздуха в застроенной части города.

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

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00160, <https://rscf.ru/project/25-27-00160/>.

Для цитирования: 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

Original article
doi: 10.17072/2079-7877-2025-2-141-153
EDN: TVOFCU

BIOACCUMULATION OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS IN MOSSES RESULTING FROM ATMOSPHERIC DEPOSITION (A CASE STUDY OF THE CITY OF PERM)

Evgeniya L. Gatina¹, Pavel Yu. Sannikov², Valeriya V. Chetyrkina³

^{1, 2, 3} Perm State University, Perm, Russia

¹ suslovael@mail.ru

² sol1430@gmail.com

³ lera.rrr16@gmail.com



© 2025 Эта работа Гатиной Е.Л., Санникова П.Ю., Четыркиной В.В. лицензирована по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

Abstract. The paper compares data on the accumulation of a number of potentially toxic elements (hereinafter – PTE) in mosses and on the distribution of the main anthropogenic emission sources in the city of Perm, a large transport hub and industrial center. At the stage of field work, 144 samples of *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. and *Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al. were collected in the afforested part of the city according to the standard methodology *Moss survey protocol*. In the Frank Laboratory of Neutron Physics at the Joint Institute for Nuclear Research, the concentrations of 15 PTEs were determined in moss samples: Al, Fe, V, Cr, Cu, Pb, S, Zn, Cd, Co, Sr, Mn, Ba, P, and Hg. Spatial analyses were performed by GIS tools. Median values of Al, Fe, and V concentrations accumulated in mosses of Perm, along with Udmurtia and the South Urals, are noticeably higher than the same indicators in other surveyed territories. The opposite trend was observed in relation to Mn. This is probably due to the pronounced metallurgical and machine-building profile of the Ural regions as well as the presence of industries related to metal processing. Median concentration s(mg/kg) of accumulated PTEs have been found to decrease in the following series: Al (1803.00) > Fe (1685.00) > Mn (350.00) > Ba (72.8) > Zn (60.19) > Sr (32.80) > Cu (10.94) > V (6.20) > Pb (5.69) > Cr (5.27) > Co (1.12) > Cd (0.22) > Hg (0.039). According to the study results, the main probable sources of air pollution in Perm are oil refineries, chemical, metalworking, and machine-building enterprises as well as motor transport emissions and railway infrastructure facilities. The obtained data significantly add to the qualitative and quantitative picture of aerotechnogenic pollution of Perm relative to the classical data obtained from permanent observation posts monitoring the state of atmospheric air in the built-up part of the city.

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

Funding. The research is supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-27-00160, <https://rscf.ru/project/25-27-00160/>.

For citation: Gatina, E.L., Sannikov, P.Yu., Chetyrkina, V.V. (2025). Bioaccumulation of potentially toxic elements in mosses resulting from atmospheric deposition (a case study of the city of Perm). *Geographical Bulletin*. No. 2(73). Pp. 141–153. doi: 10.17072/2079-7877-2025-2-141-153. EDN: TVOFCU

Введение

Многочисленными исследованиями установлена корреляция между атмосферными выпадениями загрязняющих веществ и их концентрациями во мхах. Начиная с 1980-х гг., в европейских странах, а в настоящее время и в России, проводятся исследования содержания загрязняющих веществ во мхах. В Европе создана Программа оценки воздействия загрязнения воздуха на естественную растительность и сельскохозяйственные культуры (ICP Vegetation) [35]. Особенно важно наблюдение за качеством атмосферного воздуха в городах, где сконцентрирована большая часть населения.

Пермь – город с развитой сетью внутригородских и внешних обходных автомагистралей, и один из крупнейших промышленных центров России. Город расположен в Предуралье. Современная Пермь – один из самых крупных по площади городов России (около 800 км²), в состав которого входят значительные площади лесных территорий. Более 40 % территории города заняты городскими лесами. На начало 2025 г. в Перми организовано 29 особо охраняемых природных территорий на площади чуть более 14 тыс. га, что составляет 17,5 % от общей площади города [13].

В отличие от стационарных постов контроля качества атмосферного воздуха, мхи-биомониторы отражают средневзвешенную концентрацию загрязнений воздуха за трехлетний период – в нашем случае за 2019–2021 гг. Кроме того, специфика наших данных (существенно отличающая их от материалов Росгидромета и муниципальных экологических служб) состоит в том, что они показывают степень загрязнения воздуха в незаселенной части города, приходящейся на городские леса. Всё это обуславливает актуальность исследования.

Исследования содержания потенциально токсичных элементов, в том числе тяжёлых металлов, в различных средах на территории Перми и/или отдельных его районов, природных объектов, проводились ранее [12, 6, 11, 2, 8, 19, 26]. В настоящей работе мы используем данные, полученные при помощи мхов-биомониторов, образцы которых были отобраны в лесах города Перми в 2022–2023 гг., особое внимание уделяя пространственному анализу данных, взаимосвязи накопления ряда потенциально токсичных элементов (далее – ПТЭ) во мхах и географии основных вероятных источников антропогенных выбросов.

Цель работы – географический анализ накопления ПТЭ во мхах на территории города Перми.

Для ее достижения поставлены задачи:

- визуализировать накопление ПТЭ во мхах городских лесов Перми и сопоставить полученные данные с распределением промышленных объектов, железнодорожными и автомагистралями города;
- выявить вероятные источники загрязнения атмосферного воздуха соединениями ПТЭ;
- установить районы города с наибольшим загрязнением атмосферы соединениями ПТЭ в 2019–2022 гг.

Материал и методика

Краткая характеристика района исследования

Территория г. Перми является зоной повышенного потенциала загрязнения атмосферы. Процессы рассеивания примесей в приземном слое атмосферы осложняются инверсиями, застойными явлениями, штилями и другими метеорологическими явлениями [16].

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

Климат изучаемой территории – умеренно-континентальный. Средняя температура июля $+17,9^{\circ}\text{C}$, января $-14,7^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков – 627 мм [20]. Преобладают суглинистые и дерново-подзолистые почвы.

Пермь расположена на границе двух лесорастительных районов: таежной зоны и зоны хвойно-широколиственных лесов. В 2019–2021 гг. (период накопления ПТЭ в отобранных образцах мхов) на территории Перми преобладали ветры юго-западного, южного и восточного направлений (рис. 2, РВ).

В структуре промышленного производства Перми важное место занимают машиностроение, нефтехимия, деревообработка и пищевая промышленность (рис. 1).

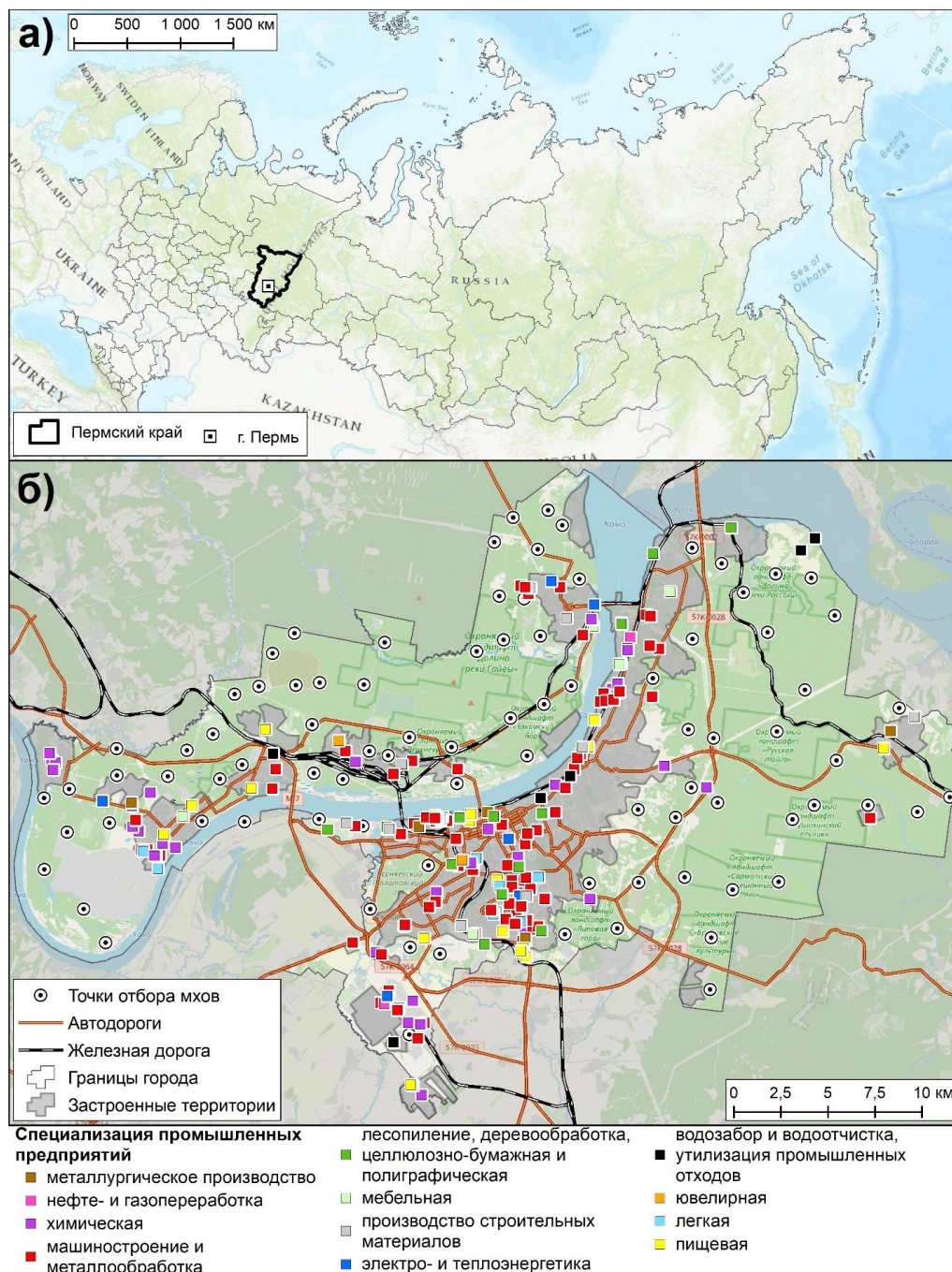


Рис. 1. Район исследования: а) Пермский край среди регионов России; б) основные источники антропогенных выбросов (показаны по [3]) Перми и точки отбора образцов мхов-биомониторов

Fig. 1 Study area: а) Perm region among the regions of Russia; б) main sources of anthropogenic emissions (shown according to [3]) in Perm and sampling points for biomonitor mosses

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

В западной части города сконцентрированы предприятия химической промышленности, на юго-западе сосредоточены предприятия нефтехимической, химической промышленности и теплоэнергетики, в центральной части города находится комплекс предприятий машиностроения и металлообработки, химической и легкой промышленности, в северной правобережной части города сосредоточены предприятия деревообработки и целлюлозно-бумажной специализации, на востоке города расположены предприятия машиностроения и металлообработки, металлургические производства [3].

На территории Перми основными источниками химического загрязнения, формирующими специфику загрязнения атмосферного воздуха населенных мест, являются промышленные предприятия и автотранспорт [15].

В районах Перми оборудовано 7 действующих стационарных постов наблюдений за состоянием атмосферного воздуха. Посты наблюдений подразделяются на «городские фоновые» – в жилых районах (посты №№ 16 (ул. Пушкина, 112); 20 (ул. Крупской, 83)), «промышленные» (посты №№ 12 (ул. Качканарская, 45), 14 (ул. Льва Шатрова, 1), 18 (ул. Победы, 41), 17 (ул. Архитектора Связева, 52)) и «авто» – вблизи автомагистралей с интенсивным движением транспорта (пост № 13 (ул. Уральская, 91)). Наблюдения производятся по 24 загрязняющим веществам: взвешенные вещества (пыль), диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота, оксид азота, сероводород, фенол, хлорид водорода, фторид водорода, аммиак, формальдегид, бенз(а)пирен, бензол, ксилолы, толуол, этилбензол, тяжелые металлы (хром, свинец, марганец, никель, цинк, медь, железо, кадмий).

За 2022 год на указанных постах отобрано и проанализировано 63 793 пробы атмосферного воздуха. Средние за год концентрации: взвешенные вещества – 0,8 ПДК; диоксид серы, диоксид азота, оксид азота, аммиак, сероводород – ниже 1 ПДК; оксид углерода – 0,2 ПДК; бенз(а)пирен – 0,3 ПДК; фторид водорода – 1,1 ПДК; хлорид водорода – 1,4 ПДК; формальдегид – 2,7 ПДК; фенол – 0,8 ПДК. Средняя за год концентрация марганца составляет 1,4 ПДК. По остальным исследуемым тяжелым металлам средние за год концентрации не превысили 1 ПДК. Максимальные из среднесуточных концентраций тяжелых металлов: марганец – 1 случай 2,1 ПДК, свинец – 1 случай 2,2 ПДК. По хрому, свинцу, цинку, меди, железу, кадмию, превышений ПДКс.с. не обнаружено [16].

Сбор и первичная обработка проб

Отбор мхов-биомониторов проведен в 2022–2023 гг. в административных границах Перми. Образцы собраны со 144 точек. Часть образцов с близкорасположенных точек отбора в дальнейшем объединялась в сборные пробы. Всего было проанализировано 87 образцов (рис. 1).

Отбор проб листостебельных мхов велся с мая по октябрь в лесах различного типа: зеленомошных, реже черничных, травянистых, произрастающих преимущественно на дерново-подзолистых, реже на песчаных почвах. В качестве модельных мхов приняты плевроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.) и гиелокомиум блестящий (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Bruch et al.). Оба вида рекомендованы для проведения исследований [31] и распространены в городских лесах Перми.

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 Объединённого института ядерных исследований в г. Дубне.

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

Остальные элементы (Al, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, 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 HNO₃ и 2 мл H₂O₂. Образцы минерализовали в микроволновой системе MARS6 (СЕМ, 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 тяжелых металлов с помощью ИСП-ОЭС Plasmaquant PQ 9000 Elite (Analytik Jena, Германия).

Статистическую обработку материалов проводили с применением программ STATISTICA 10.

Фоновую концентрацию определяли путем нахождения среднего от трех минимальных значений с использованием методов описательной статистики.

Контроль качества анализа

Для контроля качества анализа использовали стандарт INCT-PVTL-6 (Polish Virginia Tobacco Leaves (Табачные листья)) [29].

Пространственный анализ полученных данных

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

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

Результаты и их обсуждение

В таблице представлены медианные, минимальные и максимальные значения концентраций ПТЭ во мхах Перми, фоновые значения для Перми, а также аналогичные данные по Удмуртии [10], Тверской области [36], Московской области [37], Южному Уралу [14], Ленинградской области [5], Беларуси [1] и Норвегии [21] (табл. 1).

Для Перми медианные концентрации (мг/кг) накапливаемых ПТЭ снижаются в биогеохимическом ряду абсолютных содержаний: Al (1803,00) > Fe (1685,00) > Mn (350,00) > Ba (72,8) > Zn (60,19) > Sr (32,80) > Cu (10,94) > V (6,20) > Pb (5,69) > Cr (5,27) > Co (1,12) > Cd (0,22) > Hg (0,039).

Отдельно отметим, что для четырех элементов (Mn, S, Zn и Pb) максимальное значение в биогеохимическом ряду превышает предыдущее в два и более раз. При этом для Mn, S, Zn такие статистические экстремумы пришлись на одну и ту же точку на западе левобережной части города. В целом, наличие таких «статистических выбросов» (выдающихся на общем фоне значений), с нашей точки зрения, связано либо с неудачным выбором точки отбора образца, либо с ошибкой при проведении лабораторных анализов. Так или иначе, такие значения не входили в систему ранжирования на 7 квантилей и отмечались на картах особым символом.

Накопление ПТЭ во мхах городских лесов Перми показано на рис. 2 (Al, Fe, V, Cr, Cu, Pb, S) и рис. 3 (Zn, Cd, Co, Sr, Mn, Ba, P, Hg).

В литературе нередко отмечается сходство распределений Al, Fe, V, корреляция их концентраций во мхах в отдельных случаях достигает 0,77 [25]. Эти элементы ассоциируются с ветровым переносом почвенной пыли и с загрязнениями от транспорта.

Распределение **Al** по обследованной территории представлено на рис. 2–Al. Наибольшие значения отмечаются в восточной части города и на севере правобережной части, где находятся предприятия машиностроения и металлообработки, металлургические производства. Также повышенные значения отмечены вдоль крупных автомагистралей. Al фиксируется во мхах как индикатор почвенной пыли, переносимой ветром и промышленного загрязнения. Пространственная структура концентраций Al во мхах может свидетельствовать о влиянии переноса частиц почвы ветром [25]. Кроме того, повышенное содержание Al отмечено в точках на севере правобережной части города. Это может быть обусловлено расположением здесь крупного кабельного завода «Камский кабель», который по темпам роста объемов производства и переработке меди и алюминия является лидером среди производителей кабельной продукции России [4].

Повышенные значения **Fe** во мхах (рис. 2–Fe) отмечаются также, как и для Al, в восточной части города и на севере правобережной части, где представлены предприятия машиностроения и металлообработки, металлургические производства. Значения от 1,62 до 2,42 г/кг отмечены вдоль крупнейших авто- и железнодорожных магистралей, проходящих по территории города.

Схожее с Fe и Al распределение **V** (рис. 2–V). Повышенные значения V отмечены в восточной части города и на севере в правобережной части города. Кроме того, на юго-западе города вокруг крупного промышленного узла химических и нефтехимических предприятий также отмечаются высокие концентрации V во мхах. Известно, что нефть является одним из источников выбросов V и S [22]. Ванадий присутствует в топливных маслах всех типов двигателей [33].

Медианные значения концентраций Al, Fe и V, накопленные во мхах Перми, наряду с Удмуртией и Южным Уралом, заметно выше, чем тот же показатель среди остальных обследованных территорий (табл.). Вероятно, это обусловлено выраженным металлургическим, машиностроительным профилем территорий, а также наличием производств, связанных с переработкой металлов. В случае с высокими концентрациями V в Перми дополнительным фактором стало наличие крупного нефтехимического узла на юго-западе города.

Концентрации **Cr** отражают загрязнение от переноса почвенной пыли. Также этот элемент входит в состав тормозных накладок, образуется при сгорании масла [23]. В целом, определение концентраций Cr во мхах связано со значительной неопределенностью. Так, с 1990 г. средняя концентрация Cr во мхах в странах Европейского союза снизилась на 24 %, что намного меньше, чем снижение выбросов Cr предприятиями (на 71 %) [25].

Территориально повышенные значения в Перми отмечены в зоне влияния промышленного узла на юго-западе левобережной части города и на северо-востоке (рис. 2–Cr). Сходные результаты получены при изучении распределения химических элементов в снежном покрове [12], где авторы отмечали аномально высокие значения в снеге по некоторым элементам: Cd, Pb, P, Zn, Ni, Cu, Cr, Co, Ba, Mn и Sr.

Содержание потенциально токсичных элементов (мг/кг) в образцах мха, медиана (минимальное-максимальное значение)
The content of potentially toxic elements (mg/kg) in moss samples, median (spread of min-max values)

Элемент	г. Пермь, n=144 [26]	г. Пермь (фон*)	Удмуртия, 2022, n=26 [10]**	Южный Урал, 2004, n=76 [17]	Тверская область, 2024, n=144 [42]	Московская область, 2022, n=156 [43]	г. Тихвин, 2014, n=36 [5]**	Беларусь, 2021, n=250 [11]	Норвегия, 1995, n=299 [24]
Al	1803 (564-9038)	600,4	2485 (562-8830)	2300 (810-8877)	414 (178,0-898)	853 (108-2990)	871 (288-2630)	740 (102-9200)	460 (100-3050)
Ba	72,8 (19,72-169,10)	22,80	98 (18,7-211)	43 (6-129)	30 (4,3-93)	44,0 (3,1-113,0)	27 (7,27-80)	21 (5,00-94)	25 (53-130)
Cd	0,22 (0,12-0,55)	0,12	-	-	0,21 (0,09-0,98)	0,24 (0,08-0,54)	-	0,33 (0,107-1,09)	0,08 (0,02-1,33)
Co	1,12 (0,34-3,75)	0,41	0,84 (0,273-2,45)	0,57 (0,14-2,75)	0,26 (0,10-0,56)	0,38 (0,11-1,07)	0,31 (0,13-1,29)	0,349 (0,087-7,02)	0,2 (0,06-23)
Cr	5,27 (2,07-15,57)	2,15	11,46 (2,49-35,8)	11 (1,5-194,3)	0,83 (0,45-2,40)	2,63 (1,01-7,5)	79 (2,86-1610)	2,45 (0,181-11,6)	0,7 (0,2-17)
Cu	10,94 (6,58-22,64)	6,95	-	22 (3,4-200)	4,7 (2,6-11,0)	7,61 (3,03-43)	4,30 (1,36-11)	5,47 (2,79-32,8)	4,2 (1,8-370)
Fe	1685,00 (489,90-6088,0)	568,07	1585 (418-5250)	1689 (335-20730)	308 (180-705)	690 (254-2270)	475 (249-1310)	466 (110-2243)	310 (78-8125)
Mn	350,00 (50,99-3137,00)	81,38	363 (179-1260)	285 (59-1402)	417 (46-1137)	449 (0,46-1540)	447 (110-862)	418 (43-1852)	400 (40-1660)
P	2752,00 (1405,0-4042,0)	1738,00	-	-	-	-	-	-	-
Pb	5,69 (2,72-14,7)	2,88	-	-	2,7 (1,5-7,6)	4,82 (1,33-14,0)	-	2,72 (0,916-8,47)	0,05 (0,001-0,4)
S	1601,00 (1009,0-4641,0)	1154,33	-	-	1022 (744-1721)	-	-	-	-
Sr	32,80 (19,42-87,50)	21,35	41,2 (16,1-71,6)	-	15 (5,4-74)	15,3 (4,2-30,5)	11 (1,26-25)	11 (3,68-65)	136 (3,8-60)
V	6,20 (2,12-24,28)	2,18	5,2 (1,5-14)	7,0 (2,0-28,8)	1,0 (0,49-2,5)	1,90 (0,32-5,3)	1,54 (0,81-3,84)	1,35 (0,298-9,57)	1,2 (0,3-14)
Zn	60,19 (34,72-201,80)	36,82	45,5 (21,5-85,3)	58 (15-304)	38,0 (23-88)	57,0 (1,3-145)	39 (24,10-152)	37 (14-157)	31 (8-409)
Hg	0,039 (0,018-0,096)	0,0225	-	-	37,0 (21-68)	-	-	-	0,05 (0,005-0,53)

Примечания:

* – фоновые значения определены путем нахождения среднего от трех минимальных значений в ранжированном ряду.

** – для территории Удмуртии и г. Тихвин Ленинградской области вместо медианного приведены средние значения концентрации.

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

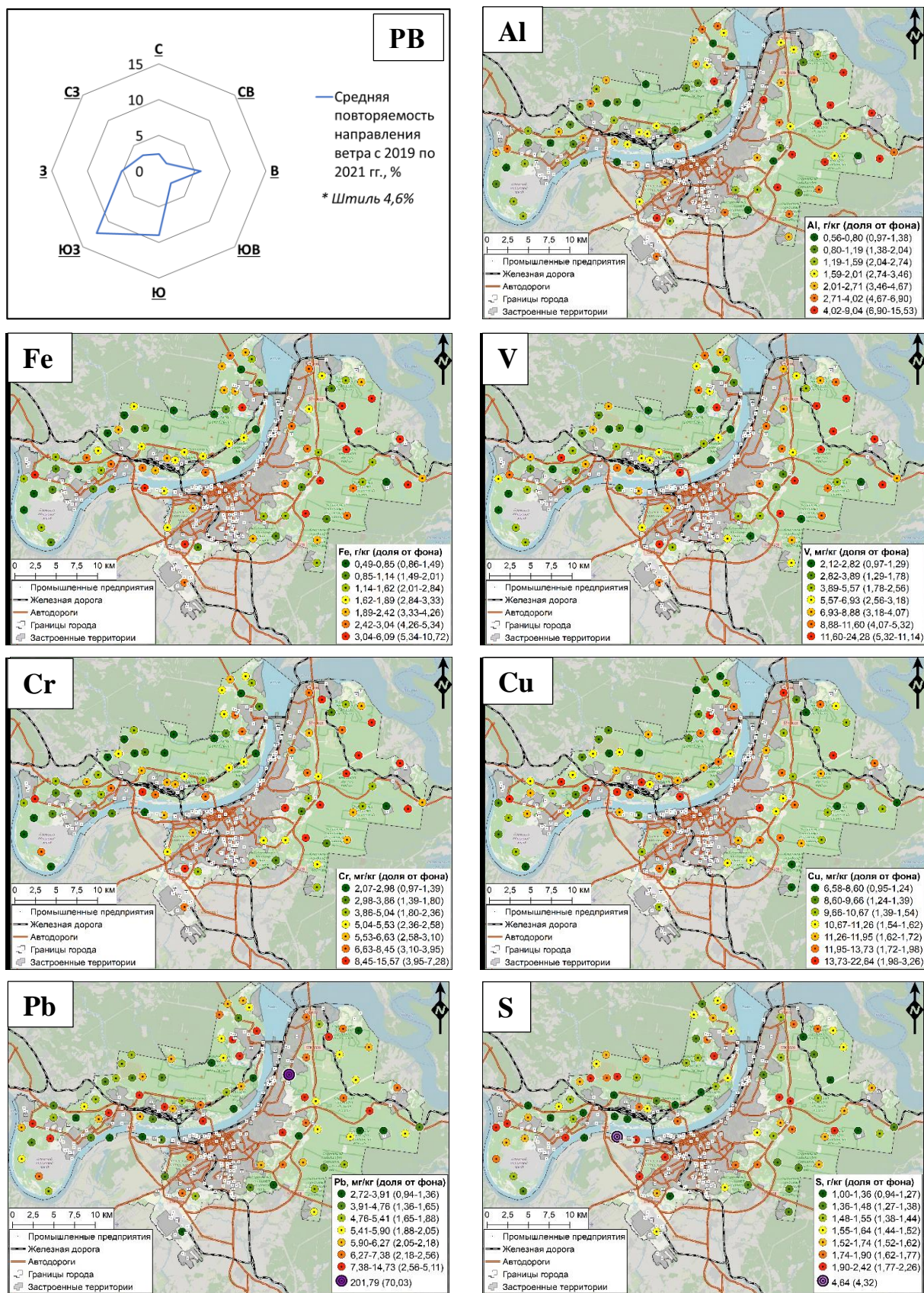


Рис. 2. Накопление ПТЭ во мхах города Перми: РВ – роза ветров города Перми за 2019–2021 гг.;

Al – алюминий, Fe – железо, V – ванадий, Cr – хром, Cu – медь, Pb – свинец, S – сера

Fig. 2. Accumulation of potentially toxic elements in mosses of Perm city: PB - wind rose of Perm in 2019–2021;

Al – aluminum, Fe – iron, V – vanadium, Cr – chromium, Cu – copper, Pb – lead, S – sulfur

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

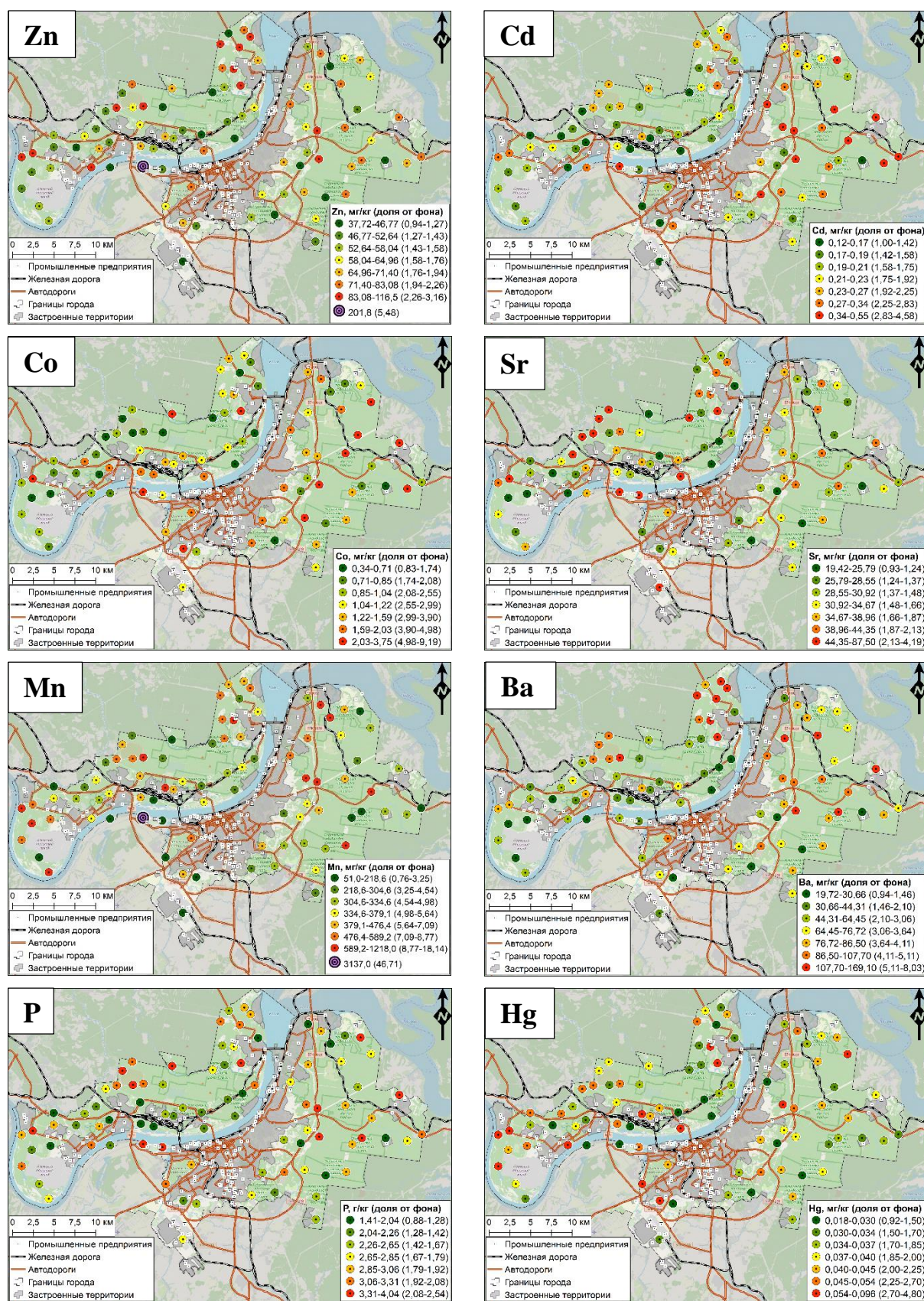


Рис. 3. Накопление ПТЭ во мхах Перми:

Zn – цинк; Cd – кадмий; Co – кобальт; Sr – стронций; Mn – марганец; Ba – барий; P – фосфор; Hg – ртуть

Fig. 3. Accumulation of potentially toxic elements in mosses of Perm city:

Zn – zinc; Cd – cadmium; Co – cobalt; Sr – strontium; Mn – manganese; Ba – barium; P – phosphorus; Hg – mercury

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

Для **Cu** отмечаются повышенные значения на севере города в правобережной части, где находятся предприятия кабельной продукции (рис. 2–Cu). Ряд точек с высоким содержанием Cu отмечен вблизи железных дорог и крупного сортировочного пункта железнодорожного транспорта, а также рядом с автомагистралями. Сжигание топлива и производство цветных металлов являются основными антропогенными источниками выбросов Cu в атмосферу [32]. Максимальные концентрации меди приходятся на центральные части города на обоих берегах Камы вдоль крупных автомагистралей.

При распределении **Pb** во мхах по территории города максимальные концентрации зафиксированы в центральной части на обоих берегах реки Камы (рис. 2–Pb). Отдельные точки с высокими содержаниями отмечены в западной и восточной окраинах города. Основными антропогенными источниками Pb в окружающей среде считаются: сжигание неэтилированного бензина, сжигание угля, металлургическая деятельность и сжигание отходов [24]. Использование неэтилированного бензина и значительный вклад автотранспорта в загрязнение атмосферного воздуха города, скорее всего, определяют повышенные концентрации соединений Pb в центральной части Перми.

Отдельно следует отметить, что среднее содержание Pb во мхах Перми заметно выше аналогичного уровня по всем остальным сравниваемым территориям (табл.).

Крайне высокое значение, выявленное в образце вблизи микрорайонов Вышка-2 и Кислотные дачи.

Соединения **S** во мхах распределены по территории города неравномерно (рис. 2–S). Повышенные концентрации соединений S во мхах зафиксированы на западе правобережной части города, где сосредоточены предприятия химической промышленности. Известно, что S – один из основных компонентов, используемых для производства черного пороха [34]. Переработка нефти также является одним из источников выбросов S в атмосферу, что подтверждается повышенными значениями в юго-западной части левобережья Перми, где находятся предприятия нефте- и газопереработки.

При распределении **Zn** по территории города высокие значения зафиксированы во мхах, отобранных в северной и западной части правобережья, а также вдоль крупных автомагистралей (рис. 3–Zn). Соединения Zn в основном используются для гальванизации (50 %), производства автомобильных шин (20 %), литья под давлением (17 %), производства латуни (17 %), а также для изготовления плитки, керамики и стекла [27].

Медианные значения концентрации Zn во мхах Перми (60,2 мг/кг) сопоставимы с Южным Уралом (58 мг/кг), Московской областью (57 мг/кг) и гораздо выше, чем в других обследованных районах (табл.).

Высокое содержание соединений **Cd** во мхах почти полностью отмечается в восточной части города (рис. 3–Cd). Возможно, такое распределение обусловлено влиянием автодорог, а также деятельностью предприятий машиностроения и металлообработки.

Большая часть загрязнения Cd окружающей среды вызвана промышленными и автотранспортными выбросами, захоронением и сжиганием загрязненных кадмием отходов, использованием минеральных удобрений [18].

При распределении **Co** по территории города высокие значения зафиксированы во мхах, отобранных в северной части правобережья, вдоль крупных автомагистралей и на северо-западе левобережной части (рис. 3–Co). При этом медианное значение содержания Co во мхах по Перми (1,12 мг/кг) выше всех сравниваемых территорий (табл.).

Для Удмуртии, Тверской области установлено, что Co отражает поступление элементов как в процессе выветривания поверхностного слоя земной коры и отработанных горных пород, так и в результате промышленной переработки топлива [10, 36]. Для Албании Co отнесен к элементам геогенного и антропогенного происхождения, которые являются производными местной промышленности по производству железа, никелевых и феррохромовых заводов, расположенных в пределах района исследования [28].

Максимальные концентрации **Sr** отмечены на промышленных территориях в северной, северо-западной и на западе правобережной части города (рис. 3–Sr). Источником Sr могут быть фосфорные удобрения; металлургия легирующих сталей, производство пиротехники [9].

При распределении **Mn** по территории города высокие значения зафиксированы во мхах, отобранных в северной части правобережья, вдоль крупных автомагистралей и на западе правобережной части города (рис. 3–Mn). Известно, что в непосредственной близости от локального источника загрязнения (медно-никелевый комбинат) на стадии техногенного редколесья концентрации Ca, K, P, Mg, Mn существенно ниже фоновых показателей [17]. В этом смысле обращают на себя внимание низкие значения Mn в точках поблизости от крупного сортировочного железнодорожного узла Перми, где, как показано выше, отмечались (рис. 2–Cu) высокие значения накопления Cu.

По медианному значению Mn во мхах лесов Перми (350 мг/кг) (вместе с Удмуртией (363 мг/кг) и Южным Уралом (285 мг/кг)) отличается наиболее низкими концентрациями среди обследованных территорий (табл.).

При распределении **Ba** по территории города высокие значения зафиксированы во мхах, отобранных в северной части правобережья (рис. 3–Ba). Ba относится к подвижным ионам, играющим важную роль в биохимических процессах, наличие этого и других элементов во мхах обусловлено как гомеостазом, так и аккумуляцией атмосферных осадков [1]. Примечательно, что территориально выпадения Ba сконцентрированы в восточной и северо-восточной частях города, где находятся предприятия химии, производства кабельной продукции, машиностроения и металлообработки.

Распределение концентрации **P** во мхах схожи с таковыми по Ba. Повышенные значения зафиксированы во мхах, отобранных в северной части правобережья города (рис. 3–P).

Как отмечалось выше, близость техногенного источника выбросов Cu и Ni может приводить к снижению концентрации P [17]. В этом отношении минимальное содержание P может быть связано с близостью к крупному сортировочному железнодорожному узлу, где отмечались (рис. 2–Cu) высокие значения накопления Cu.

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

Распределение выпадений **Hg** по территории города демонстрирует участки локального загрязнения (рис. 3–Hg) в северной и северо-западной частях правобережной части, где расположены предприятия химической промышленности. Также ряд точек с высокими концентрациями Hg выявлен вблизи Осенцовского промышленного узла, сортировочного железнодорожного узла и в районе Камской долины.

К основным антропогенным источникам Hg можно отнести: нефтепереработку и использование нефтепродуктов, производство золота, производства цемента и извести, использование и последующую утилизацию ртутьсодержащих приборов и изделий электроники и электротехники, использование пестицидов [7]. Так, для Косово отмечено повышенное содержание Hg во мхах на пробных площадках, расположенных вблизи нефтеперерабатывающего завода в Митовице, а также угольных электростанций [30].

Заключение

Проведенные исследования демонстрируют высокую информативность метода мхов-биомониторов для исследования многоэлементного состава атмосферных выпадений на территории Перми.

При визуализации накопления ПТЭ во мхах городских лесов Перми и сопоставлении полученных данных с распределением промышленных объектов, авто- и железнодорожных магистралей города наблюдаются следующие особенности. В восточной части города во мхах установлены высокие концентрации Al, Fe, V, Cu, Pb, Zn, Cd, Co, Sr, что обусловлено влиянием автодорог, а также деятельностью предприятий машиностроения и металлообработки. На севере правобережной части города, где расположены предприятия машиностроения и металлообработки, производства кабельной продукции, зафиксировано повышенное содержание во мхах Al, Cu, Fe, V, Pb, Co, Sr, Mn, Ba, P, Hg. На западе правобережной части города сосредоточены предприятия химической промышленности, что, по-видимому, обуславливает высокие уровни накопления во мхах S, Mn, Hg. На юго-западе левобережной части города выявлено повышенное содержание во мхах V, Cr, Pb, Zn, S, Hg. Вероятно, это связано с наличием здесь предприятий химической и нефтехимической промышленности. Вдоль авто- и железнодорожных магистралей, проходящих по территории города, зафиксированы высокие значения во мхах Al, Fe, Cu, Co, Pb. А вблизи крупного сортировочного пункта железнодорожного транспорта во мхах зафиксированы высокие концентрации Cu и низкие Mn, а также минимальное содержание P.

Медианные значения концентраций Al, Fe и V, накопленные во мхах Перми, наряду с Удмуртией и Южным Уралом, заметно выше, чем тот же показатель среди остальных обследованных территорий. Вероятно, это обусловлено выраженным металлургическим, машиностроительным профилем территории, а также наличием производств, связанных с переработкой металлов. В случае с высокими концентрациями V в Перми дополнительным фактором стало наличие крупного нефтехимического узла на юго-западе города.

Анализы, проведенные в отобранных образцах мха, свидетельствуют о состоянии атмосферы лишь за трехлетний период (2019–2021 гг.). Поэтому в будущем, имея целью формирование более длинного и репрезентативного ряда данных динамики потенциально токсичных элементов, целесообразно продолжить исследования накопления атмосферных выпадений во мхах-биомониторах на территории Перми.

Полученные данные позволяют оценить экологическую ситуацию на территории Перми и могут служить ценной дополнительной (к режимным наблюдениям на стационарных постах гидрометеорологической службы) информацией для планирования мероприятий по охране окружающей среды и оптимизации системы наблюдений за качеством атмосферного воздуха в городе.

Библиографический список

1. Алексеев Ю.В. Бриондикация атмосферных выпадений металлов и металлоидов в Республике Беларусь: диссертация на соискание степени канд. геогр. наук. Калининград, 2022. 194 с. EDN: WKFYVS
2. Андреев Д.Н. Экогеохимическая диагностика антропогенной трансформации особо охраняемых природных территорий: диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. Пермь, 2012. 164 с. EDN: SUOQUB
3. Атлас города Перми / под ред. А.А. Зайцева, С.В. Пьянкова, Е.С. Перминовой. Пермь: ПГНИУ, 2024. 108 с.
4. Вдовина Е.Ю. Особенности качества производства кабельно-проводниковой продукции ООО «Камский кабель», г. Пермь // Проблемы и перспективы развития АПК региона: материалы Межвузовской студенческой научно-практической конференции, Пермь, 25–29 ноября 2024 года. Пермь: ИПЦ Прокрость, 2025. С. 54–58. EDN: WFJGYW
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 // Экологическая экспертиза, оценка и прогноз. 2014. № 2. С. 92–101. EDN: SLTXEJ
6. Ворончихина Е.А., Запоров А.Ю. Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове г. Перми // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала. Пермь: Перм. ун-т, 2000. С. 132–134.
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: ZDDQDL
8. Дзюба Е.А. Природно-техногенное геохимическое районирование Пермского края // Географический вестник=Geographical Bulletin, 2024. № 3 (70). С. 139–151. DOI: 10.17072/2079-7877-2024-3-139-151 EDN: ISYVFO
9. Ермаков В.В. Стронций в биосфере. Новосибирск: ООО «Академиздат», 2023. 168 с.
10. Журавлева А.Н., Бухарина И.Л., Свиозлик В., Фронтасьева М.В., Загребин Е.А. Мониторинг следовых элементов на территории Удмуртской Республики методом нейтронного активационного анализа // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26, № 3. С. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-54-61 EDN: AREZZH
11. Ибламинов Р.Г. Тяжелые металлы в донных отложениях рек г. Перми // Экологическая безопасность зон градопромышленных агломераций Западного Урала: тез. докл. регион. конф. Пермь: Перм. ун-т, 1993. С. 27–28.
12. Копылов И.С. Эколого-геохимические закономерности и аномалии содержания микроэлементов в почвах и снежном покрове Приуралья и города Перми // Вестник Пермского университета. Геология. 2012. № 4. С. 39–46. EDN: OABIUR

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

13. Особо охраняемые природные территории города Перми / под общ. ред. Д.Н. Андреева. Пермь: МКУ «Городское зеленое строительство», 2024. 200 с.
14. 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, Вып. 1. С. 68–74. EDN: PDHPNV
15. Состояние и охрана окружающей среды г. Перми в 2021–2022 годах. Управление по экологии и природопользованию Администрации г. Перми. 2022. 141 с.
16. Состояние и охрана окружающей среды г. Перми в 2023 году. Управление по экологии и природопользованию Администрации г. Перми. 2023. 100 с.
17. 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
18. 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
19. Хайрулина Е.А., Тимофеев И.В., Кошелева Н.Е. Потенциально токсичные элементы в почвах Индустриального района г. Перми // Географический вестник. 2019. № 2 (49). С. 80–100. DOI: 10.17072/2079-7877-2019-80-100 EDN: DINUMA
20. Шкляев В.А., Шкляева Л.С. Климатические ресурсы Уральского Прикамья // Географический вестник. 2006. № 2 (4). С. 97–110. EDN: NCSGNH
21. Berg T., Røyset O., Steinnes E., Vadset M., Atmospheric trace element deposition: Principal component analysis of ICP-MS data from moss samples // Environmental Pollution. 1995. Vol. 88. P. 67–77. EDN: APHCTB
22. Celis-Hernandez O., Giron-Garcia M.P., Ontiveros-Cuadras J.F., Canales-Delgadillo J.C., Pérez-Ceballos R.Y., Ward R.D., Acevedo-Gonzales O., Armstrong-Altrin J.S., Merino-Ibarra M. Environmental Risk of Trace Elements in Mangrove Ecosystems: An Assessment of Natural vs Oil and Urban Inputs // The Science of the total environment. 2020. Vol. 730, Article number 138643. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138643 EDN: RGRBKI
23. Charron A., Polo-Rehn L., Besombes J.L., Golly B., Buisson C., Chanut H., Marchand N., Guillaud G., Jaffrezo J.-L. Identification and quantification of particulate tracers of exhaust and non-exhaust vehicle emissions // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. No. 19 (7). P. 5187–5207. DOI: 10.5194/acp-19-5187-2019
24. 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
25. 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, Dubna, Russian Federation. 2020. 136 p.
26. Gatina E., Zinicovskaia 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, Article number 2353. DOI: 10.3390/plants13172353 EDN: HSPBB
27. 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
28. Kane S.S., Bekteshi L., Allajbeu S., Lazo P. Moss biomonitoring of air quality linked with trace metals pollution around a metallurgical complex in Elbasan, Albania // Atmosphere Health. 2024. Vol. 17. P. 2045–2055. DOI: 10.1007/s11869-024-01562-x EDN: HOQESB
29. Labmix24: Polish Virginia Tobacco Leaves. URL: <https://labmix24.com/en/products/IC-INCT-PVTL-6> (дата обращения: 05.03.2024)
30. 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.
31. Moss survey protocol. URL: https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/moss-survey_ (дата обращения: 07.11.2024)
32. 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
33. 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
34. 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. 126. P. 987–996. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.003
35. 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/> (дата обращения: 20.02.2025)
36. Vergel K., Zinicovskaia 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, Article number 1191. DOI: 10.3390/atmos15101191 EDN: MBRZDN
37. Vergel K., Zinicovskaia 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, Article number 66. DOI: 10.3390/toxics10020066 EDN: AIJLKK

References

1. Alekseenok Yu.V. Briodication of atmospheric deposition of metals and metalloids in the Republic of Belarus. Dissertation for the degree of Candidate of Geographical Sciences, Kaliningrad, 2022. 194 p.
2. Andreev D.N. Ecogeochemical diagnostics of anthropogenic transformation of specially protected natural territories. Dissertation for the degree of Candidate of Geographical Sciences, Perm, 2012. 164 p.
3. Atlas goroda Permi [Atlas of the city of Perm.] / pod red. A.A. Zaitseva, S.V. P'yankova, E.S. Perminovoi. Perm': PGNIU, 2024. 108 p.

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

4. Vdovina E.Yu. Osobennosti kachestva proizvodstva kabel'noprovodnikovoi produktsii OOO «Kamskii kabel'», g. Perm' [Peculiarities of quality of cable-conductor products production of LLC Kamsky Cable, Perm] // Problems and prospects of development of agroindustrial complex of the region: Materials of the Interuniversity Student Scientific and Practical Conference, Perm, November 25–29, 2024. Perm: IPC Prokrost, 2025. Pp. 54–58.
5. Vergel' K.N., Goryainova Z.I., Vikhrova I.V., Frontas'eva M.V. Metod mkhov-biomonitorov i GIS-tehnologii v otsenke vozdukhnykh zagryaznenii promyshlennymi predpriyatiyami Tikhvinskogo raiona Leningradskoi oblasti [Moss-biomonitor method and GIS-technologies in assessment of air pollution by industrial enterprises of Tikhvin District of Leningrad Region] // Environmental expertise, assessment and forecasting, 2014, No.2. Pp. 92–101.
6. Voronchikhina E.A., Zaporov A.YU. Tyazhelye metally v pochvenno-rastitel'nom pokrove g. Permi [Heavy metals in the soil and vegetation cover of Perm] // Issues of physical geography and geoecology of the Urals / Perm. un-t, Perm'. 2000. Pp. 132–134.
7. Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Ermolaev B.V. Raspreделение rtuti v prirodnykh i urbanizirovannykh sredakh Karelii [Distribution of mercury in natural and urbanized environments of Karelia] // Human Ecology, 2019. No 4. Pp. 10–17.
8. Dziuba, E.A. (2024). Natural-technogenic geochemical zoning of the Perm Territory. Geographical Bulletin. No. 3(70). Pp.139–151. doi: 10.17072/2079-7877-2024-3-139-151
9. Ermakov V.V. Strontsii v biosphere [Strontium in the biosphere]. Novosibirsk: OOO «AkademizdaT», 2023. 168 s.
10. Zhuravleva A.N., Bukharina I.L., Svozilik V., Frontasyeva M.V., Zagrebina E.A. Monitoring sledovykh elementov na territorii Udmurtskoy Respubliki metodom neytronnoho aktivatsionnogo analiza [Trace elements monitoring in Udmurt Republic by neutron activation analysis]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2022, Vol. 26, No. 3, Pp. 54–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-54-61
11. Iblaminov R.G. Tyazhelye metally v donnykh otlozheniyakh rek g. Permi [Heavy metals in river bottom sediments of Perm] // Environmental safety of urban-industrial agglomeration zones in the Western Urals: tez. dokl. region. konf. / Perm. un-t, Perm'. 1993. Pp. 27–28.
12. Kopylov I.S. Ecological and Geochemical Regularities and Anomalies on Microelements in Soils and Snow Cover of the Priurals and the City of Perm // Bulletin of Perm University. Geology. 2012. No.4. Pp. 39–46.
13. Osobo okhranyaemye prirodnye territorii goroda Permi [Specially Protected Natural Territories of the City of Perm] / edited by D.N. Andreev. Perm: MKU “Urban Green Building”, 2024. 200 p.
14. Smirnov L.I., Frontas'eva M.V., Steinnes E., Lyapunov S.M., Cherkintsev V.D., Romanov S.A., Samosadny V.T. Mnogomernyi statisticheskii analiz kontsentratsii tyazhelykh metallov i radionuklidov vo mkhakh i pochve Yuzhnogo Urala [Multivariate statistical analysis of heavy metal and radionuclide concentrations in mosses and soil of the Southern Urals] // Atomnaya ehnergiya, 2004, T. 97, Vol. 1. Pp. 68–74.
15. Sostoyanie i okhrana okruzhayushchei sredy g. Permi v 2021–2022 godakh [State and protection of the environment of Perm in 2021–2022]. Upravlenie po ehkologii i prirodoopol'zovaniyu Administratsii g. Permi, 2022. 141 p.
16. Sostoyanie i okhrana okruzhayushchei sredy g. Permi v 2023 godu [State and protection of the environment of Perm in 2023]. Upravlenie po ehkologii i prirodoopol'zovaniyu Administratsii g. Permi, 2023. 100 s.
17. Sukhareva T. A. Ehlementnyi sostav zelenykh mkhov fonovykh i tekhnogenno-narushennykh territorii [The green moss elemental composition of the background and industrially disturbed areas] // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta, 2018. № 3 (172). Pp. 89–96.
18. Fazlyyeva A.S., Daukaev R.A., Karimov D.O. Vliyanie kadmiya na zdorov'e naseleniya i sposoby profilaktiki ego toksicheskikh ehffektov [Influence of cadmium on public health and ways to prevent its toxic effects] // Labor Medicine and Human Ecology. 2022. No 1(29). Pp. 220–235. DOI: 10.24411/2411-3794-2022-10115.
19. Khayrulina, E.A., Mitrakova, N.V., Novoselova, L.V., Poroshina, N.V. Soil and vegetation transformation under the influence of the pouring out ancient brine wells in Perm krai. Geographical Bulletin. No.4(59). Pp. 113–129. doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-113-129.
20. Shklyayev V.A., Shklyayeva L.S. Klimaticheskie resursy Ural'skogo Prikam'ya [Climatic resources of the Ural Kama region] // Geographical Bulletin. 2006. № 2(4). C. 97–110.
21. Berg T., Røyset O., Steinnes E., Vadset M., Atmospheric trace element deposition: Principal component analysis of ICP-MS data from moss samples // Environmental Pollution, 1995, Vol. 88, P. 67–77.
22. Celis-Hernandez O., Giron-Garcia M.P., Ontiveros-Cuadras J.F., Canales-Delgadillo J.C., Pérez-Ceballos R.Y., Ward R.D., Acevedo-Gonzales O., Armstrong-Altrin J.S., Merino-Ibarra M. Environmental Risk of Trace Elements in Mangrove Ecosystems: An Assessment of Natural vs Oil and Urban Inputs // The Science of the total environment, 2020, Vol. 730, Article number 138643. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138643
23. Charron A., Polo-Rehn L., Besombes J.L., Golly B., Buisson C., Chanut H., Marchand N., Guillaud G., Jaffrezo J.-L. Identification and quantification of particulate tracers of exhaust and non-exhaust vehicle emissions // Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(7), P. 5187–5207. https://doi.org/10.5194/acp-19-5187-2019
24. 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. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823292-7.00004-8
25. 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, Dubna, Russian Federation, 2020. 136 p.
26. Gatina E., Zinikovskaia 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, Article number 2353. https://doi.org/10.3390/plants13172353
27. Jones F., Bankiewicz D., Hupa M. Occurrence and sources of zinc in fuels // Fuel, 2014. Vol. 117, Part A, P. 763–775 https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.005
28. Kane S.S., Bekteshi L., Allajbeu S., Lazo P. Moss biomonitoring of air quality linked with trace metals pollution around a metallurgical complex in Elbasan, Albania // Atmosphere Health. 2024. Vol. 17. P. 2045–2055. https://doi.org/10.1007/s11869-024-01562-x

Экология и природопользование
Гатина Е.Л., Санников П.Ю., Четыркина В.В.

29. Labmix24: Polish Virginia Tobacco Leaves [Электронный ресурс] <https://labmix24.com/en/products/IC-INCT-PVTL-6> (дата обращения: 05.03.2024)
30. 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.
31. Moss survey protocol [Электронный ресурс] <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/moss-survey> (дата обращения: 07.11.2024).
32. 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. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05073-6>
33. 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, 46(1), P. 189–195. <https://doi.org/10.1021/es200463c>
34. 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, 126, P. 987–996. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.003>
35. United Nations Economic Commission for Europe International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops [Электронный ресурс] <http://icpvegetation.ceh.ac.uk/> (дата обращения: 20.02.2025).
36. 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, Article number 1191. DOI: 10.3390/atmos15101191
37. 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, Article number 66. DOI: 10.3390/toxics10020066

Статья поступила в редакцию: 02.02.25, одобрена после рецензирования: 05.05.25, принята к опубликованию: 13.06.25.

The article was submitted: 2 February 2025; approved after review: 5 May 2025; accepted for publication: 13 June 2025.

Информация об авторах

Евгения Леонидовна Гатина

кандидат биологических наук, доцент
кафедры биогеоценологии и охраны природы,
Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Пермь, ул. Букирева, 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

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, 15

Pavel Yu. Sannikov

Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor, Department of Biogeocenology
and Nature Protection, Head of the Laboratory of Eco-
logical and Geoinformation Systems,
Perm State University;
15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: sol1430@gmail.com

Валерия Вячеславовна Четыркина

студент географического факультета,
Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Valeriya V. Chetyrkina

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

e-mail: lera.rrr16@gmail.com

Вклад авторов

Гатина Е.Л. – идея статьи, организация полевых работ, постановка задач исследования, подготовка текста статьи, вычитка статьи.

Санников П.Ю. – подготовка текста статьи и рисунков, вычитка статьи.

Четыркина В.В. – подготовка рисунков, вычитка статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

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

Pavel Yu. Sannikov – writing of the article; preparation of the figures; proofreading.

Valeriya V. Chetyrkina – preparation of the figures; proofreading.

The authors declare no conflict of interest.