

УДК 504.3.054
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5182
Шифр специальности ВАК: 1.6.21
Научная статья

Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Кемерово на основе изучения снегового покрова (Кемеровская область)

В.Д. Новикова[✉], А.В. Таловская, Е.Г. Язиков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]vdk10@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* работы определяется необходимостью эколого-геохимической оценки состояния промышленно-урбанизированных территорий с эффектом «городского острова тепла» в регионах с устойчивым залеганием снегового покрова, где происходит накопление техногенных эмиссий в воздухе за счет частых атмосферных инверсий и слабого ветрового режима в зимний сезон, наличия городской застройки. *Цель:* оценка эколого-геохимического состояния территории г. Кемерово, крупного промышленного центра химической и теплоэнергетической отрасли, на основе изучения снегового покрова как естественного аккумулятора атмосферных выпадений. *Объекты:* нерастворимая фракция снежного покрова. *Методы:* площадная снегогеохимическая съемка, инструментальный нейтронно-активационный анализ, атомно-абсорбционная спектрометрия, сканирующая электронная микроскопия, статистические и эколого-геохимические методы. *Результаты и выводы.* Пылевая нагрузка на территорию города изменяется от 15 до 609 при среднем 207 мг/(м²·сут.). Ореол с высоким уровнем пылевой нагрузки (240–600 мг/(м²·сут.)) формируется в северной части города с частной и высокоэтажной застройкой, теплоэнергетическими и химическими предприятиями; со средним (60–240 мг/(м²·сут.)) – на большей части города; с низким (20–60 мг/(м²·сут.)) – в западной и южной частях, где расположены частный сектор и малоэтажные здания, производство удобрений. Техногенная геохимическая специфика нерастворимой фракции снежного покрова выражена в повышенных уровнях накопления относительно фона U, Yb, Tb, La, Sm, Ba (10–22 фона), Ce, Sr, Ca, Ta, Na, Th, Lu, Hf, Nd, Sc (2–10 фона), в полиэлементной ассоциации (Sc-Co-Ba-La-Ce-Yb-Lu-Hf-Th-U), формирующей средний уровень загрязнения. Обнаружены микрочастицы фосфатов цериевых, сульфатов бария, сульфидов свинца с примесями цинка и железа, характеризующие формы нахождения металлов в снеговом покрове. Выделены три атмогеохимических ореола: первый ореол с полиэлементной ассоциацией (Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U) занимает основную часть города, связан с переносом выбросов от предприятий и автотранспорта; второй ореол (Cr-Zn-Br-Sb) расположен в рекреационных зонах, сформирован преимущественно влиянием автотранспорта; третий ореол (Ca-Cs-Ta-Th-Hg) приурочен к зоне воздействия предприятий теплоэнергетики и коксохимии, где используются угли Кузнецкого бассейна. Геохимические ассоциации в нерастворимой фракции снежного покрова могут быть использованы в качестве индикаторов геохимического фона «городского острова тепла», формируемого выбросами теплоэнергетической и химической промышленности, автотранспортом.

Ключевые слова: снеговой покров, тяжелые металлы, радиоактивные и редкоземельные элементы, теплоэлектростанция, коксохимическое производство, пылевая нагрузка, городской остров тепла

Благодарности. Авторы выражают благодарность аналитикам Александру Федоровичу Судыко и Ларисе Васильевне Богутской за выполнение аналитических работ методом инструментального нейтронно-активационного анализа, кандидату химических наук, доценту отделения геологии Томского политехнического университета Нине Александровне Осиповой за консультирование в процессе определения концентрации ртути в пробах, Екатерине Анатольевне Филимоненко и Дарье Анатольевне Володиной за содействие в 2016 г. в отборе и подготовке проб снегового покрова, кандидату геолого-минералогических наук, доценту отделения геологии Томского политехнического университета Ильенку Сергею Сергеевичу за консультирование в процессе определения частиц на электронном сканирующем микроскопе.

Исследования выполнены в НИ ТПУ в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования УНУ ИРТ-Т и МИНОЦ «Урановая геология» ТПУ.

Для цитирования: Новикова В.Д., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Оценка эколого-геохимического состояния территории города Кемерово на основе изучения снегового покрова (Кемеровская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 210–223. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5182

UDC 504.3.054
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5182
Scientific paper

Eco-geochemical assessment of Kemerovo city using snow cover (Kemerovo region)

V.D. Novikova✉, A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉vdk10@tpu.ru

Abstract. Relevance. Assessing pollution in urbanized areas under "heat island" conditions and snow cover, which accumulates emissions due to atmospheric inversions, low wind speeds, and dense urban development. **Aim.** To evaluate the eco-geochemical status of Kemerovo – a major chemical and thermal power plant – by analysing insoluble particulate matter in snow cover. **Objects.** Insoluble fraction of snow cover. **Methods.** Snow geochemical survey, instrumental neutron activation analysis, atomic absorption spectrometry, scanning electron microscopy, statistical/ecological-geochemical methods. **Results and conclusions.** Particulate load ranged 15–609 mg/(m²·day) (mean: 207). Hazardous pollution level (240–600 mg/(m²·day)) occurred in northern districts with residential zones, thermal power plant and chemical enterprises. Moderately hazardous (60–240 mg/(m²·day)) dominated in central areas. Allowable (20–60 mg/(m²·day)) is typical for western/southern sectors (low-rise housing, fertilizer production). Elevated concentrations of U, Yb, La, Ba, Ce, Sr, and others (2–22 background) formed distinct association (Sc-Co-Ba-La-Ce-Yb-Lu-Hf-Th-U) indicating moderate pollution. Microparticles of cerium phosphates, barium sulfates, lead sulfides with Zn/Fe admixtures were found, characterizing the modes of metal occurrence in the snow cover. Three atmogeochemical aureole were identified: 1. aureole with an association (Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U) cover the main part of the city and associated with emissions from plants and vehicles; 2. aureole (Cr-Zn-Br-Sb) located in residential and recreational areas, formed mainly by the influence of transport; 3. aureole (Ca-Cs-Ta-Th-Hg) confined to the zone of influence of thermal power plant and coke industry enterprises, where coal from the Kuznetsk basin is used. Geochemical associations in the insoluble fraction of snow cover can be used as an indicator of the geochemical background of the "urban heat island" formed by emissions from the thermal power plant and vehicles.

Keywords: snow cover, heavy metals, radioactive and rare earth elements, thermal power plant, coke industry enterprises, particulate load, urban heat island

Acknowledgements. The authors express their gratitude to analysts Alexander F. Sudyko and Larisa V. Bogutskaya for performing analytical work using instrumental neutron activation analysis, to Nina A. Osipova, Cnad. Sc., Associate Professor at the Geology Division of Tomsk Polytechnic University, for her consultation during mercury concentration determination in the samples, and to Ekaterina A. Filimonenko and Darya A. Volodina for their assistance in snow cover sampling and preparation in 2016. Special thanks to Sergey S. Ilienok, Cand. Sc., Associate Professor at the Geology Division of Tomsk Polytechnic University, for his guidance in particle analysis using scanning electron microscopy.

This research was conducted at the National Research Tomsk Polytechnic University as part of our program to enhance the competitiveness of Tomsk Polytechnic University among the world's leading research institutions.

The work was carried out using the equipment provided by the center for shared use of the Educational and Scientific Center "Nuclear Research Reactor" and the International Innovative Science and Education Center "Uranium Geology", named after L.P. Rikhvanov, at Tomsk Polytechnic University.

For citation: Novikova V.D., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Assessment of the ecological and geochemical condition of the Kemerovo city territory based on the study of snow cover (Kemerovo region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 210–223. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5182

Введение

В условиях современной урбанизации и интенсивного развития промышленности наблюдается формирование так называемого «городского острова тепла» – явления, при котором температура в городской промышленной зоне значительно превышает температуру окружающих территорий. Это связано с высокой концентрацией антропогенных источников тепла, таких как теплоэлектростанции,

транспорт, промышленные предприятия, а также с изменением природного ландшафта.

«Городской остров тепла» оказывает значительное влияние на микроклимат и экологическую обстановку, особенно в регионах с устойчивым залеганием снегового покрова, где зимние метеорологические процессы характеризуются высокой частотой атмосферных инверсий и слабым ветровым режимом [1–3]. В таких условиях формируются

устойчивые пограничные слои атмосферы с мало-мощным слоем перемешивания, ограниченным высотой городской застройки. Это способствует накоплению техногенных эмиссий тепла и загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. В сочетании с теплоотдачей жилых и промышленных зданий это приводит к формированию местного «парникового эффекта» и «аэрозольной шапки» над городом. Аэрозольная шапка над городами Сибири, возникающая вследствие суперпозиции выбросов в приземном слое и вышерасположенных источников, имеет вертикальные размеры в несколько сотен метров (400–600 м) и несколько десятков километров по горизонтали [4].

Аэрозольная шапка, состоящая преимущественно из аэрозолей твердых частиц, играет ключевую роль в накоплении загрязняющих веществ в приземном слое воздуха. Твердые частицы содержат микроэлементы, которые оказывают влияние на эколого-геохимическую обстановку и здоровье населения, вызывая респираторные и сердечно-сосудистые заболевания [5, 6]. Кроме того, они участвуют в процессах формирования осадков, включая снеговой покров.

Снеговой покров используется многими исследователями как индикатор состава атмосферных выпадений, поскольку аккумулирует твердые частицы с комплексом химических элементов природного и антропогенного происхождения [7–10]. Следовательно, снеговой покров становится ценным объектом для эколого-геохимических исследований в условиях «городского острова тепла». В работе [11] показано, что соотношения концентраций химических элементов в жидкой фазе снега при послойном опробовании снегового покрова могут быть геохимическими маркерами застойных зон в «городском острове тепла». Однако концентрация химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и их пространственное распределение в условиях «городского острова тепла» изучены недостаточно.

Особенно актуально изучение в зимний сезон геохимических особенностей состава аэрозолей твердых частиц в «острове тепла» Сибирских городов с развитой промышленной инфраструктурой, например, таких как Кемерово, где сосредоточены крупные предприятия теплоэнергетики и химической промышленности страны [12, 13]. Статья посвящена оценке эколого-геохимического состояния территории г. Кемерово на основе анализа пространственного распределения пылевой нагрузки, концентраций и ассоциаций химических элементов, включая малоизученные в геохимическом плане редкие элементы, в нерастворимой фракции снежного покрова.

Материалы и методы

Снегогеохимическая съемка проводилась на территории г. Кемерово в соответствии с методом площадной съемки, масштабом 1:50000 со сгущением и разряжением сети в некоторых районах. Всего было отобрано 68 проб снега в течение четырех зимних сезонов (2016, 2020, 2022 и 2023 гг.). Методика отбора проб, основанная на опубликованных материалах [14, 15] и методических рекомендациях [16, 17], включала: 1) полное извлечение снежного шурфа с исключением 5-сантиметрового приконтактного слоя для исключения почвенной примеси; 2) использование пластикового инструмента для предотвращения вторичного загрязнения; 3) расположение точек отбора с учетом размещения промышленных предприятий и удаленности от транспортных магистралей (не менее 20 м); 4) доступности и репрезентативности участка для отбора проб.

Подготовка проб к анализу осуществлялась по следующим этапам: 1) таяние проб снегового покрова при комнатной температуре; 2) отделение нерастворимой фракции от жидкой фазы снега путем использования беззольного фильтра типа «синяя лента»; 3) просушивание фильтров с нерастворимой фракцией при комнатных условиях; 4) просеивание фракции (сито с ячейками 1 мм); 5) определение массы полученной фракции.

В лабораториях учебно-научного центра «Исследовательский ядерный реактор» центра коллективного пользования УНУ ИРТ-Т и международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» на базе отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета проводился анализ проб нерастворимой фракции снежного покрова. Элементный состав исследовали с применением инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА), которым определены концентрации в пробах 26 приоритетных элементов (параметры облучения: поток тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·с)). Применялся метод атомно-абсорбционной спектрометрии с пиролизной приставкой (РА-915М с приставкой ПИРО-915+) для определения концентрации ртути (предел обнаружения – 5 нг/г).

С помощью электронного сканирующего микроскопа (S-3400N фирмы Hitachi) с энергодисперсионной приставкой для микроанализа (Bruker XFlash 4010) проведена идентификация металлосодержащих микрочастиц.

Для количественной оценки загрязнения снежного покрова использованы эколого-геохимические показатели:

1. Пылевая нагрузка P_n (мг/(м²·сут.)) по формуле (1):

$$P_n = \frac{P_0}{S \cdot t}, \quad (1)$$

где P_0 – масса нерастворимой фракции снежного покрова, мг; S – площадь снегового шурфа, м²; t – количество суток от начала снегостава до дня отбора проб.

Полученные значения P_n мг/(м²·сут.) оценивают уровни загрязнения территории по градации, относительно фона для Сибири [18]: менее 20 – около-фоновый; 20–60 – низкий; 60–240 – средний; 240–600 – высокий; более 600 – очень высокий.

2. Коэффициент концентрации (K_c) для каждого химического элемента рассчитывался по формуле (2):

$$K_c = \frac{C}{C_{\phi}}, \quad (2)$$

где C – содержание элемента в пробе, мг/кг; C_{ϕ} – фоновая концентрация элемента, мг/кг. Фоновые концентрации элементов в нерастворимой фракции снежного покрова приняты по опубликованным работам [18–20].

После расчета K_c составлялся геохимический ассоциативный ряд элементов с наибольшими коэффициентами концентрации в порядке убывания, что характеризует аномальность содержания химических элементов в пробах.

3. Суммарный показатель загрязнения (Z_c) снегового покрова изучаемыми химическими элементами рассчитывался по формуле (3):

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1), \quad (3)$$

где n – число элементов, имеющих $K_c > 1,5$ с учетом флуктуации фона.

По полученным значениям Z_c определяют уровни загрязнения территории по общепринятой градации [14–17]: менее 64 – низкий; 64–128 – средний; 128–256 – высокий; более 256 – очень высокий.

Для комплексного анализа результатов исследования был применен многоуровневый статистический подход с использованием программного обеспечения Statistica. С помощью описательной статистики определены среднеарифметические значения, стандартные отклонения, коэффициенты вариации, медиана, мода, минимум и максимум, показатели асимметрии и эксцесса. Для выделения геохимических ассоциаций в пробах и факторов их формирования использовали корреляционный, кластерный, факторный анализ и метод К-средних. Корреляционная связь была обнаружена между элементами в пробах нерастворимой фракции снежного покрова с помощью коэффициента корреляции Пирсона и Спирмена. Схема расположения города и точек опробования была создана в

программе CorelDRAW. Схемы пространственного распределения пылевой нагрузки, зонирования территории по результатам анализа геохимических данных комплексом статистических методов были построены с помощью программы Surfer.

Результаты и обсуждения Уровень пылевой нагрузки

Уровень пылевой нагрузки на территории г. Кемерово изменяется от 15 до 609 мг/(м²·сут.) (табл. 1). Распределение пылевой нагрузки на территории города характеризуется логнормальным законом распределения согласно расчетам теста Колмагорова–Смирнова и отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам (более 3 ед.).

Средний уровень пылевой нагрузки составил 207 мг/(м²·сут.), что соответствует среднему уровню загрязнения по градации относительно фона. Медианное значение (201 мг/(м²·сут.)) близко к среднему, что подтверждает симметричное распределение данных без значительных выбросов. Полимодальное распределение, которое имеет несколько часто встречающихся значений, что может быть связано с разнородностью источников загрязнения (промышленность, транспорт, городской ландшафт). Коэффициент вариации составляет 74 %, такое распределение характеризуется как сильно неоднородное, что соответствует урбанизированным территориям с разнообразными источниками загрязнения.

Таблица 1. Статистические параметры пылевой нагрузки на территории г. Кемерово по данным снеговой съемки

Table 1. Statistical parameters of particulate load on the territory of Kemerovo according to snow survey data

n	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S
68	207	146	201	полимодальное распределение multimodal distribution	15	609	152
δm	V	A	δA	E	δE	A/δA	E/δE
19	74	0,6	0,3	–0,5	0,6	2	–0,8

Примечание: n – объем выборки (количество проб), m – среднее, $X_{геом}$ – среднее геометрическое; X_{med} – медиана, X_{mod} – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса.

Note: n is the sample size (number of samples), m is the average, $X_{геом}$ is the geometric mean; X_{med} is the median, X_{mod} is the mode, Min is the minimum, Max is the maximum, S is the standard deviation, δm is the standard error of the average, V is the coefficient of variation, A is the asymmetry, δA is the standard error asymmetries, E is the kurtosis, and δE is the standard error of the kurtosis.

По всей площади города выделены три зоны с разным уровнем пылевой нагрузки (рис. 1). Первая зона имеет площадь 19 км² и отличается высоким уровнем пылевой нагрузки относительно фона (240–600 мг/(м²·сут.)). В данной зоне находятся частный сектор и разноуровневая застройка с преобладанием высокоэтажных жилых зданий. Пространственное расположение соответствует северной части города и начинается от 1,5 км и достигает 4 км с подветренной стороны от предприятий теплоэнергетики и коксохимии, где происходит основной массоперенос загрязняющих веществ.

Вторая зона площадью 66 км² характеризуется средним уровнем пылевой нагрузки (60–240 мг/(м²·сут.)). Зона охватывает большую часть города с жилыми, рекреационными зонами и транспортными развязками.

Третья зона площадью 12 км² с низким уровнем пылевой нагрузки относительно фона (20–60 мг/(м²·сут.)) находится преимущественно на периферии города, в частности в районе расположения завода по производству азотистых удобрений в западном районе города, частной и малоэтажной застройки – в южной части города.

Формирование зон с высоким и низким уровнем пылевой нагрузки в северной части и на периферии

города, соответственно, вероятно, отражает влияние эффекта «острова тепла». Вблизи предприятий температура воздуха будет выше, чем на удалении от него, из-за теплового воздействия самих предприятий, что приводит к образованию над ними «острова тепла», что способствует высокому накоплению загрязняющих веществ в окрестностях источников выбросов. Высокий уровень загрязняющих веществ в приземном слое воздуха в зимний период обусловлен не только интенсификацией антропогенных источников, но и воздействием характерных для этого периода приземных температурных инверсий, препятствующих эмиссии аэрозоля в вышележащие слои атмосферы [21, 22]. Дополнительно на городскую атмосферную циркуляцию оказывает влияние ориентация и высота зданий, плотность застройки, характер озеленения. В комплексе данные процессы приводят к формированию «шапки» загрязнений. Следовательно, вышеописанные механизмы городской локальной циркуляции в зимний период способствуют увеличению концентрации аэрозольных примесей в атмосферном воздухе, которые затем осаждаются на дневную поверхность и приводят к увеличению массы пыли в снеговом покрове.

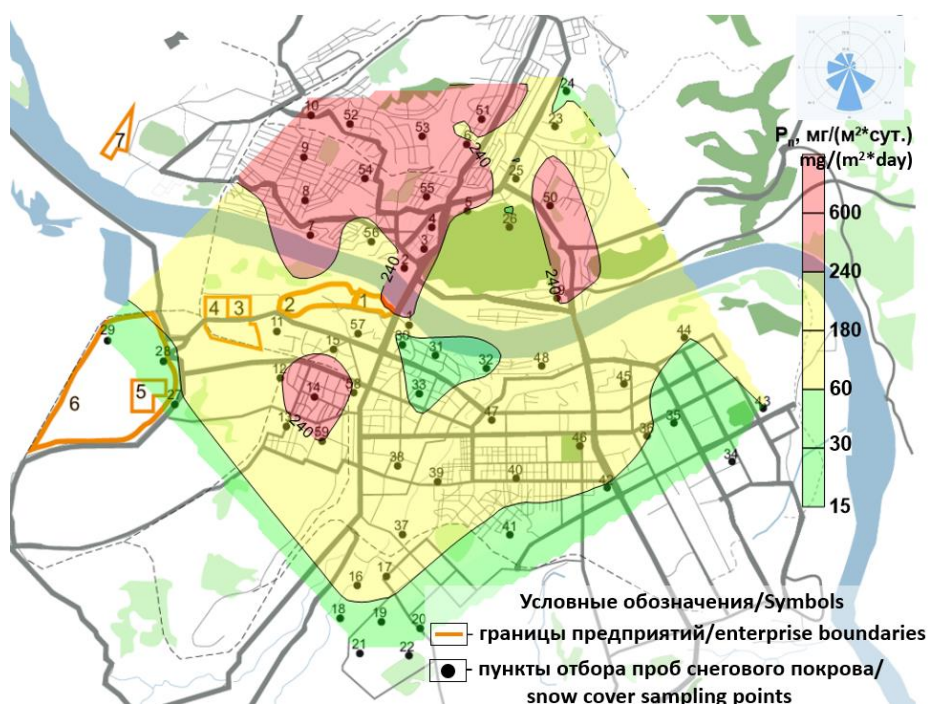


Рис. 1. Схема распределения пылевой нагрузки на территорию г. Кемерово («роза» ветров приведена на зимний период, градация по уровню пылевой нагрузки относительно фона [18]). Крупные предприятия: 1 – ГРЭС, 2 – коксохимический завод, 3 – механический завод, 4 – производство гипохлорита кальция, 5 – ТЭЦ, 6 – завод азотистых удобрений, 7 – ТЭЦ

Fig. 1. Scheme of particulate load distribution in Kemerovo (the «rose» of winds is shown for the winter period, gradation according to the level of particulate load relative to background [18]). Large enterprises: 1 – thermal power plant; 2 – coke industry enterprises; 3 – mechanical engineering plant; 4 – calcium hypochlorite production facility; 5 – thermal power plant; 6 – nitrogen fertilizer plant; 7 – thermal power plant

Уровень пылевой нагрузки в г. Кемерово имеет превышение от 1,5 до 7 раз в отличие от некоторых городов Кемеровской области (рис. 2).

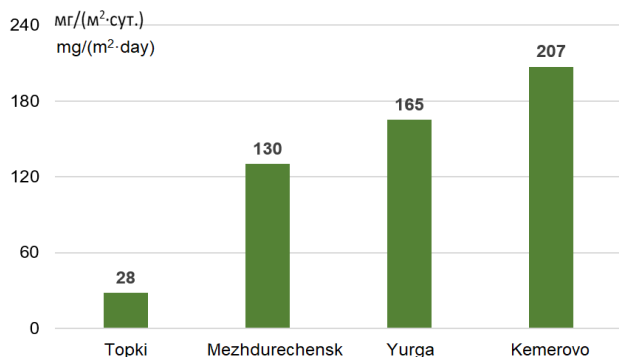


Рис. 2. Средние значения пылевой нагрузки в отдельных городах Кемеровской области (Топки [23]; Междуреченск [24]; Юрга [20]; Кемерово – данные авторов)

Fig. 2. Average particulate load values in the cities of the Kemerovo region (Topki [23]; Mezhdurechensk [24]; Yurga [20]; Kemerovo – authors' data)

Химический состав нерастворимой фазы снежного покрова

По результатам исследований в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово установлены уровни накопления макроэлементов (Ca, Na, Fe), тяжелых металлов и металлоидов (Ba, Co, Cr, Zn, As, Hg, Sb, Sr), лантаноидов (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu), U, Th, Rb, Cs, Ta, Hf, Sc.

Нормальный закон распределения содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова установлен для Na, Sc, Fe, Co, As, Rb, Sr, Cs, La, Ce, Sm, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U, отличный от нормального – для Ca, Cr, Zn, Br, Sb, Ba, Nd, Eu, Tb по результатам теста Колмогорова–Смирнова, Лиллиефорса и расчетов величины отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам. Коэффициент вариации (V) для большинства элементов имеет значение менее 50 %, что соответствует преимущественно однородному распределению, а неоднородность распределения в выборке характерна для Ca, As, Sb (V=от 50 до 70 %).

По коэффициентам концентраций элементов выявлена степень интенсивности их накопления в пробах нерастворимой фракции снежного покрова (табл. 2). Наиболее интенсивно ($K_c > 10$) концентрируются в пробах такие элементы, как U, Yb, Tb, La, Sm, Ba. Менее интенсивно ($K_c = 2-10$) в нерастворимой фракции снежного покрова накапливаются Ce, Sr, Ca, Ta, Na, Th, Lu, Hf, Nd, Sc. Близко к фоновым концентрациям ($K_c < 1,5$) выделяются элементы Eu, Cr, As, Br.

Общий вклад химических элементов в загрязнение снежного покрова отражается с помощью сум-

марного показателя загрязнения согласно общепринятой градации [16, 25], для исследуемой территории г. Кемерово уровень загрязнения соответствует среднему значению (табл. 2).

Таблица 2. Геохимические ряды ассоциаций химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и суммарный показатель загрязнения (Zc) снежного покрова в г. Кемерово

Table 2. Geochemical series of chemical element associations in the insoluble fraction of snow cover and the total pollution index (Zc) in snow cover within Kemerovo

Геохимический ряд/Geochemical series	Zc
U₂₂–Yb₁₇–Tb₁₆–La₁₅–Sm₁₁–Ba₁₀–Ce₈–Sr₆–Ca₅–Ta₄–Na₄–Th₄–Lu₃–Hf₃–Nd₂–Sc₂–Hg₂–Co₂–Fe₂–Zn₂–Cs₂–Sb₂–Rb₂–Eu₁–Cr₁–As₁–Br₁	124

Примечание: субскрипты – значения K_c ; выделены полужирным шрифтом элементы с наиболее интенсивным накоплением, курсивом – с менее интенсивным накоплением, обычным шрифтом – элементы близкие к фоновым концентрациям.

Note: the subscripts are K_c values; the elements with the most intense accumulation are highlighted in bold, the elements with the least intense accumulation are in italics, the elements close to the background concentrations are in regular font.

Определены корреляционные связи между химическими элементами в нерастворимой фракции снежного покрова (табл. 3). Выявлены наиболее значимые коэффициенты корреляции на уровне $p < 0,01$. Высокая и очень высокая корреляционная связь (r от 0,63 до 0,92) установлена между элементами Sc, Co, Rb, Cs, Ba, La, Ce, Eu, Yb, Lu, Hf, Th, U, что может указывать на общий источник их поступления и схожие геохимические свойства.

В результате проведения кластерного анализа установлены ассоциации между химическими элементами по наивысшим мерам сходства парных коэффициентов корреляции Пирсона r . Дендрограммы корреляционных матриц содержаний химических элементов в пробах г. Кемерово представлены на рис. 3.

На дендрограмме первой представлена парная корреляция [Ba–Sr], между элементами выражена сильная связь. Второй представлена ассоциация химических элементов [Ta–Th–Cs–Rb] с умеренно сильной связью, третья парная корреляция состоит из [Nd–Ce]. Последняя обширная ассоциация [U–Eu–Co–Hf–La–Yb–Lu–Sc] с корреляционной связью от 0,67 до 0,92, после которой представлены парные корреляции [Sb–Zn], [Br–Cr], [Hg–As], [Fe–Na].

С помощью факторного анализа и К-средних определяли принадлежность элементов к факторам и точкам отбора проб по всей территории г. Кемерово. Табл. 4 демонстрирует сложную структуру загрязнения снежного покрова в г. Кемерово, где промышленные предприятия играют ключевую роль в формировании атмогеохимических ореолов.

Таблица 3. Матрица коэффициентов парной корреляции (r от 0,63 до 0,92) содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова г. Кемерово

Table 3. Matrix of coefficients of paired correlation (r from 0.63 to 0.92) of the content of chemical elements in the insoluble fraction of snow cover in Kemerovo

	Sc	Co	Rb	Cs	Ba	La	Ce	Eu	Yb	Lu	Hf	Th	U
Co	0,62	1,00											
Rb	0,64	0,31	1,00										
Cs	0,54	0,34	0,80	1,00									
Ba	0,51	0,65	0,57	0,73	1,00								
La	0,75	0,70	0,68	0,78	0,82	1,00							
Ce	0,75	0,47	0,46	0,37	0,43	0,63	1,00						
Eu	0,67	0,67	0,48	0,48	0,55	0,72	0,58	1,00					
Yb	0,82	0,51	0,62	0,61	0,62	0,80	0,62	0,59	1,00				
Lu	0,89	0,61	0,65	0,67	0,65	0,84	0,68	0,71	0,87	1,00			
Hf	0,74	0,69	0,69	0,77	0,82	0,92	0,65	0,77	0,79	0,84	1,00		
Th	0,63	0,48	0,76	0,87	0,83	0,86	0,50	0,63	0,74	0,75	0,87	1,00	
U	0,45	0,59	0,46	0,61	0,72	0,75	0,41	0,63	0,53	0,57	0,76	0,71	1,00

Примечание: $n=63$; критическое значение коэффициента корреляции 0,25 при доверительной вероятности 0,01; полужирный шрифт – значимые корреляционные связи.

Note: $n=63$; the critical value of the correlation coefficient is 0.25 with a confidence probability of 0.01; bold – significant correlations.

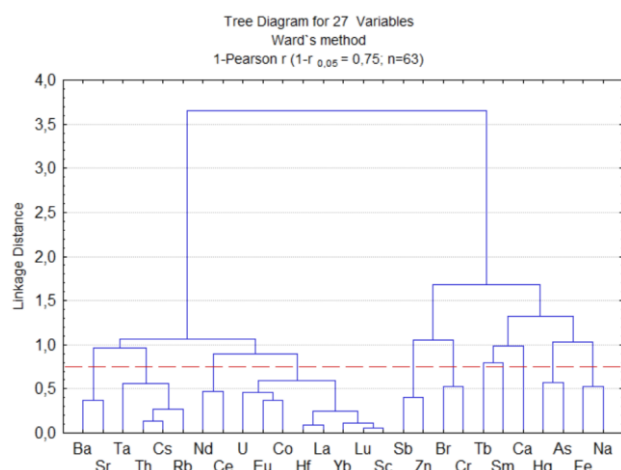


Рис. 3. Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в пробах нерастворимой фракции снежного покрова г. Кемерово

Fig. 3. Dendrogram of the correlation matrix of the geochemical spectrum of elements in samples of the insoluble fraction of snow cover in Kemerovo

«Фактор 1» обеспечивает 40 % дисперсии распределения элементов Sc, Fe, Co, Rb, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Th, U. Данный фактор объединяет первый и второй кластеры, включающие в себя большую часть точек отбора проб на территории города. Фактор ярко выражен в жилых районах города с разноуровневой застройкой, включая территории частного сектора и наветренной стороны от промышленных предприятий теплоэнергетики и химической промышленности. Данный фактор, вероятно, отражает общий геохимический фон города, обусловленный рассеиванием выбросов предприятий по всей территории города.

«Фактор 2» имеет 11 % дисперсии содержаний химических элементов, наибольшее влияние данного фактора распространяется на элементы Cr, Zn, Br, Sb. Связан с локальными источниками загрязнения, такими как автотранспорт. Фактор преимущественно проявляется в четвертом кластере отбора проб, которые имеют местонахождение в рекреационной и селитебной частях города.

На «Фактор 3» приходится только 8 % дисперсии, что включает элементы Ca, Cs, Ta, Th, Hg. Данный фактор включает точки отбора проб третьего кластера, находящиеся под влиянием выбросов предприятий теплоэнергетики, химической промышленности, в том числе и коксохимии.

Обработка геохимических данных с помощью факторного, корреляционного и кластерного анализа, метода К-средних в сочетании с графическим представлением данных в виде карт-схем позволила выделить три геохимические зоны на территории г. Кемерово, которые характеризуются различными уровнями накопления и ассоциациями ряда элементов в нерастворимой фракции снежного покрова (рис. 4).

Выявленные особенности пространственного распределения геохимических ассоциаций в нерастворимой фракции снежного покрова отражают наличие застойных зон в «городском острове тепла», формирующихся под влиянием теплоэнергетической и химической отрасли, автотранспорта и частного сектора.

Сильные корреляционные связи в геохимической ассоциации Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U могут обосновываться влиянием теплоэнергетики, что подтверждается нашими многолетними исследованиями снежного покрова в зоне влияния угольных ТЭЦ и коксохимического завода [26].

Таблица 4. Результаты факторного анализа и анализа и метода К-средних в пробах нерастворимой фракции снежного покрова г. Кемерово

Table 4. Results of factor analysis and K-means analysis in samples of insoluble fraction of snow cover in Kemerovo

Кластер точек/Sample cluster	Ф1	Ф2	Ф3
d	40	11	8
Элементы/Elements	Sc, Fe, Co, Rb, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Th, U	Cr, Zn, Br, Sb	Ca, Cs, Ta, Th, Hg
15, 26, 27, 30, 34–37, 42, 46, 57, 65, 68	Аутсайдер Outsider	Выше среднего Above average	Ниже среднего Below average
25, 38–41, 43–45, 47, 48, 50, 52–56, 58–64, 66	Выше среднего Above average	Ниже среднего Below average	Ниже среднего Below average
1–14, 18, 51		Ниже среднего Below average	Выше среднего Above average
16, 17, 19–24, 28, 29, 31–33, 49, 67		Лидер Leader	Ниже среднего Below average

Примечание: Ф – фактор, d – дисперсия, номера точек отражены на рис. 4.

Note: Ф – factor, d – variance, point numbers are shown in Fig. 4.

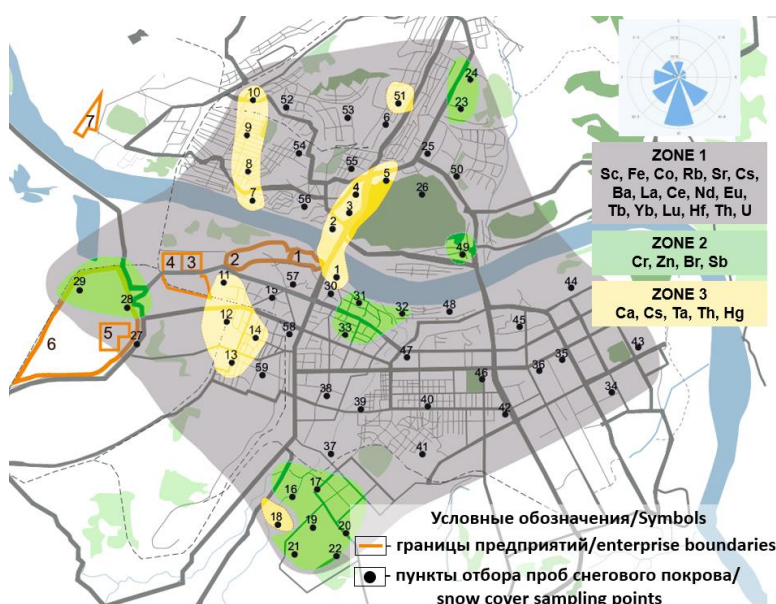


Рис. 4. Схема зонирования территории г. Кемерово по геохимическим ассоциациям в нерастворимой фракции снежного покрова. Крупные предприятия: 1 – ГРЭС, 2 – коксохимический завод, 3 – механический завод, 4 – производство гипохлорита кальция, 5 – ТЭЦ, 6 – завод азотистых удобрений, 7 – ТЭЦ

Fig. 4. Scheme of zoning of the territory of Kemerovo by geochemical associations in the insoluble fraction of snow cover. Large enterprises: 1 – thermal power plant; 2 – coke industry enterprises; 3 – mechanical engineering plant; 4 – calcium hypochlorite production facility; 5 – thermal power plant; 6 – nitrogen fertilizer plant; 7 – thermal power plant

В пробах нерастворимой фракции снежного покрова обнаружены частицы, представленные фосфатами цериевыми (рис. 5, а) и сульфатами бария (рис. 5, б). Алюмосиликатные микросферулы (рис. 5, в) и ферросферулы (рис. 5, в, г) обнаружены в пробах из различных частей города, что свидетельствует о переносе выбросов от источников сжигания топлива. Зола уноса теплоэлектростанций по составу представлена преимущественно алюмосиликатными и железистыми сферическими образованиями [27]. В пробах, находящихся под воздействием автотранспорта, обнаружены сульфиды свинца с примесью цинка и железа (рис. 5, д).

По данным С.И. Арбузова состав углей Кузнецкого бассейна характеризуется редкоземельной и

радиоактивной специализацией [28]. В углях содержатся микрофазы бария и железа, фосфаты редких металлов [29]. Кроме того, ранее нами установлена средняя и высокая степень корреляционной связи между содержанием Ca, Sc, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U в нерастворимой фракции снежного покрова и их концентрациями в золе уноса, а также между нерастворимой фракцией снега и углем [26]. Таким образом, выявленная геохимическая специфика нерастворимой фракции снежного покрова отражает влияние сжигания и использования углей на теплоэлектростанциях города и предприятиях коксохимии.

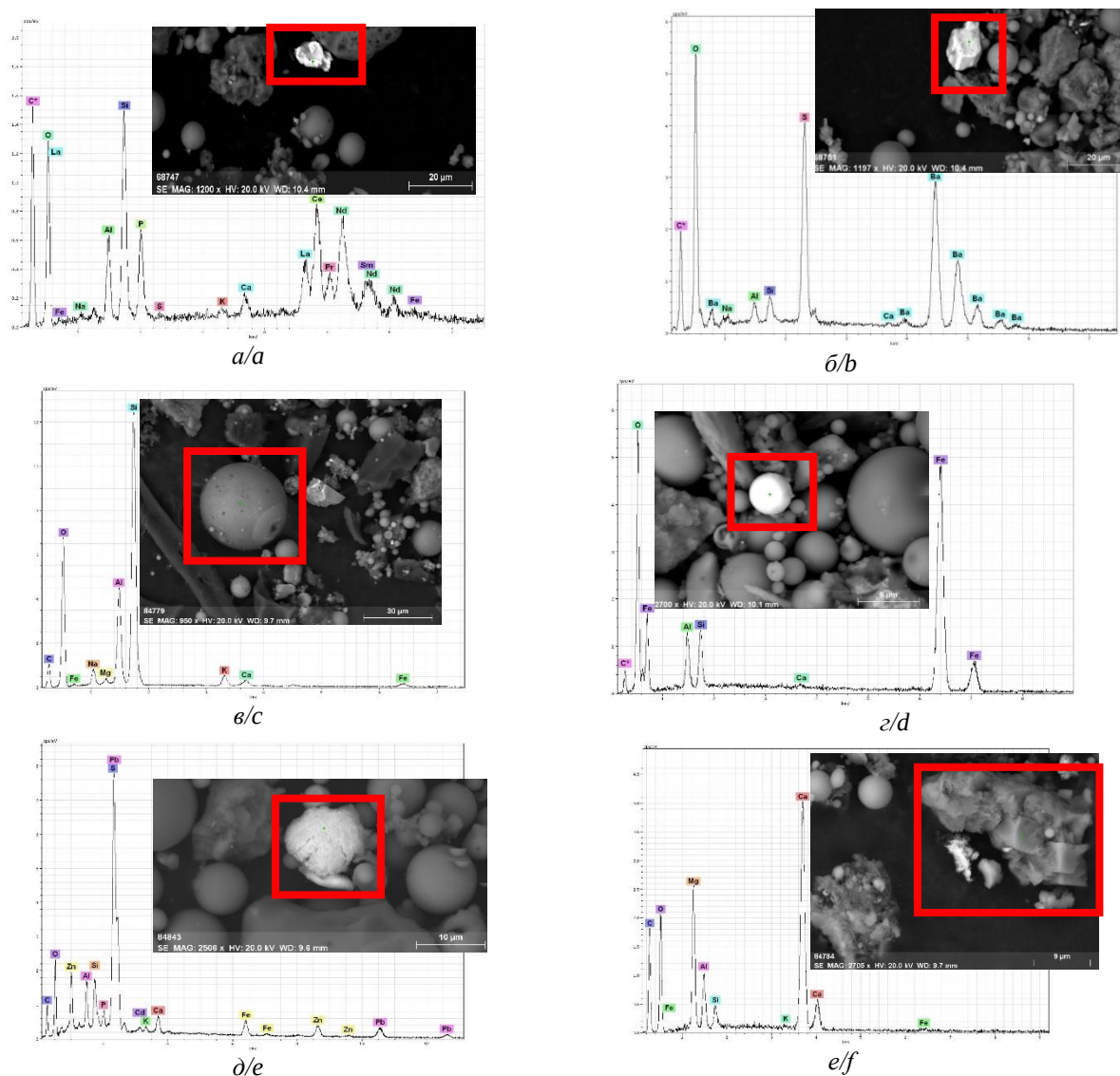


Рис. 5. Микрофотографии и энергодисперсионные спектры частиц в нерастворимой фракции снежного покрова по данным сканирующей электронной микроскопии: а) фосфаты цериевые; б) сульфаты бария; в) алюмосиликатная микросферула; г) ферросферулы; д) сульфиды свинца с примесью цинка и железа; е) Ca-содержащая фаза

Fig. 5. Micrographs and energy dispersion spectra of particles in the insoluble fraction of snow cover according to scanning electron microscopy: a) cerium phosphates; b) barium sulfates; c) aluminosilicate microspherule; d) ferrospherules; e) lead sulfides with admixture of zinc and iron; f) Ca-containing phase

В пробах ассоциация As-Hg, соединения которых при высоких температурах становятся летучими, может указывать на поступление от процессов сжигания угля и коксохимического производства. При производстве кокса в г. Кемерово эмиссия ртути в атмосферу составляла 0,073 т в год [30].

Интенсивное накопление Ca и Na и ассоциация Na-Fe в пробах нерастворимой фракции снежного покрова, вероятно, связаны с составом противогололедных реагентов. В нерастворимой фракции снежного покрова обнаружены алюмосиликатные и кальциевые микрофазы (рис. 5, е). В городах общепринято использовать в виде противогололедных

реагентов техническую соль (твердый хлорид натрия, хлорид кальция), песок и мелкий щебень с добавлениями ингибиторов коррозии [31, 32]. Дополнительным источником поступления кальция может являться предприятие по производству гипохлорита кальция (с высоким содержанием активного вещества не менее 65 %) [33]. Источником Zn, Sb, Cr могут выступать выхлопные газы автотранспорта, истирание шин, износ тормозных колодок [34–36]. Источником поступления брома могут считаться выхлопные выбросы автотранспорта [37, 38]. В дорожной пыли дворов доля многих тяжелых металлов и металлоидов (Ni, Cr, Cd, Bi, As,

Zn) возрастает [39–41]. Данное явление обусловлено спецификой транспортной нагрузки в дворовых территориях: низкая скорость движения, частые торможения и старты способствуют активному износу автокомпонентов (тормозных колодок, шин, сцепления). Как следствие, от автотранспорта в окружающую среду поступают мелкодисперсные частицы, обогащенные токсичными элементами.

Заключение

Проведенное исследование снегового покрова на территории г. Кемерово, где функционируют крупные предприятия химической, коксохимической и теплоэнергетической отрасли, использующие угли Кузнецкого бассейна, позволило получить оценку эколого-геохимического состояния территории и выявить основные источники загрязнения. Результаты исследования также показали, что выявленные особенности распределения пылевой нагрузки на территорию города и геохимические характеристики нерастворимой фракции снежного покрова отражают эффект «городского острова тепла», формируемого промышленными выбросами и автотранспортом.

В итоге можно сделать следующие выводы:

1. В г. Кемерово пылевая нагрузка изменяется от 15 до 609 при среднем 207 мг/(м²·сут.). Территория города разделена на три зоны, различающиеся по интенсивности пылевой нагрузки. Первая зона, характеризующаяся высоким уровнем пылевой нагрузки (240–600 мг/(м²·сут.)) относительно фона, расположена в северной части города с частной и многоэтажной застройкой, которая подвержена влиянию выбросов от предприятий теплоэнергетики и химического производства. Вторая зона, где зафиксирован средний уровень пылевой нагрузки (60–240 мг/(м²·сут.)), занимает основную часть городской территории, включая жилые, рекреационные районы и транспортные узлы. Третья зона с низким уровнем пылевой нагрузки (20–60 мг/(м²·сут.)) охватывает западную часть города, где расположен завод по производству азотистых удобрений, а также часть южных кварталов с малоэтажной жилой застройкой. Выявленные закономерности пространственного распределения пылевой нагрузки отражают влияние эффекта «городского острова тепла».
2. Геохимическая характеристика нерастворимой фракции снежного покрова проявляется в пре-

вышении от 2 до 22 раз над фоном концентраций 23 изучаемых химических элементов (U>Yb>Tb>La>Sm>Ba>Ce>Sr>Ca>Ta>Na>Th>Lu>Hf>Nd>Sc>Hg>Co>Fe>Zn>Cs>Sb>Rb), формирующая средний уровень загрязнения снежного покрова (Zc=124). Выявлена полиэлементная геохимическая ассоциация (Sc-Co-Ba-La-Ce-Yb-Lu-Hf-Th-U), характеризующаяся высокими и очень высокими корреляционными связями (r от 0,63 до 0,92) между элементами.

3. По результатам электронной микроскопии обнаружены микрочастицы, состоящие из характерных элементов для нерастворимой фракции снежного покрова, представленные фосфатами цериевыми, сульфатами бария, сульфидами с примесью цинка и железа и ферросферулами.
4. Обработка геохимических данных с помощью факторного, корреляционного, К-средних, кластерного методов анализа позволила выделить атмогеохимические ореолы на территории города, различающихся по уровням накопления и ассоциациям изучаемых химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова, и пространственному расположению. Первый ореол с выраженной полиэлементной ассоциацией (Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U) охватывает большую часть территории города и связан с распространением выбросов от функционирующих предприятий и автотранспорта. Для второго ореола характерна геохимическая ассоциация Cr-Zn-Br-Sb в нерастворимой фракции снежного покрова, отражающая преимущественно влияние автотранспорта. Третий геохимический ореол с ассоциацией Ca-Cs-Ta-Th-Hg расположен на территориях с наветренной и подветренной стороны от предприятий теплоэнергетики и химической промышленности (коксохимический завод, производство гипохлорита кальция).
5. Геохимические ассоциации макро- и микроэлементов (редкоземельные, радиоактивные, тяжелые металлы, металлоиды и др.) в нерастворимой фракции снежного покрова могут быть использованы в качестве геохимических индикаторов геохимического фона «городского острова тепла», формируемого выбросами теплоэнергетической и химической промышленности (коксохимия, производство азотистых удобрений, гипохлорита кальция), автотранспортом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nygard T., Valkonen T., Vihma T. Characteristics of Arctic low-tropospheric humidity inversions based on radio soundings // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2014. – Vol. 14. – P. 1959–1971. DOI: 10.5194/acp-14-1959-2014.
2. Wetzel C., Brummer B. An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40 // *Meteorol. Zeitschrift*. – 2011. – Vol. 20 (6). – P. 589–600. DOI: 10.1127/0941–2948/2011/0295.

3. Atlaskin E., Vihma T. Evaluation of NWP results for wintertime nocturnal boundary-layer temperatures over Europe and Finland // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2012. – Vol. 138. – № 667. – P. 1440–1451.
4. Симоненков Д.В. Химический состав антропогенного аэрозоля над промышленными центрами Сибири, Дальнего востока и Казахстана: автореф. дис. ... канд. наук. – Томск, 2015. – 28 с.
5. Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2006. – Vol. 56 (6). – P. 709–742. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485
6. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. – Geneva, Switzerland: WHO, 2021. – P. 273. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/345329> (дата обращения 19.04.2025).
7. Atmospheric depositions of natural and anthropogenic trace elements on the Guliya ice cap (northwestern Tibetan Plateau) during the last 340 years / M.R. Sierra-Hernández, P. Gabrielli, E. Beaudon, A. Wegner, L.G. Thompson // *Atmospheric Environment*. – 2018. – Vol. 176. – P. 91–102. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.040.
8. Артамонова С.Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 212–223. DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2731
9. Леженин А.А., Ярославцева Т.В., Рапута В.Ф. Мониторинг аэрозольного загрязнения снежного покрова на основе наземной и спутниковой информации // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. – 2016. – № 9 (7). – С. 950–959.
10. Measuring Pb isotope ratios in fresh snow filtrate refines the apportioning of contaminant sources in the Arctic / B. Astray, A. Šípková, D. Baragaño, J. Pechar, R. Krejci, M. Komárek, V. Chrastný // *Environmental Pollution*. – 2024. – Vol. 345. – 123457. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123457.
11. Геохимические маркеры застойных зон в городском острове тепла / М.П. Тентюков, К.А. Шукуров, Б.Д. Белан, Д.В. Симоненков, Г.В. Игнатъев, В.И. Михайлов // *Геохимия*. – 2023. – Т. 68. – № 1. – С. 90–104. DOI: 10.31857/S0016752523010089
12. Дудкина О.А., Минина В.И. Антропогенное загрязнение городов и его влияние на население Кемеровской области // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2011. – Т. 13. – № 5. – С. 255–258.
13. Аэрозоли в природных планшетах Сибири / А.П. Бояркина, В.В. Байковский, Н.В. Васильев, Г.Г. Глухов, М.А. Медведев, Л.Ф. Писарева, В.И. Резчиков, С.И. Шелудько. – Томск: Изд-во ТГУ, 1993. – 157 с.
14. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.В. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // *Вестник Московского университета*. – Сер. 5: География. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
15. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 335 с.
16. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами / Б.А. Ревич, Ю.И. Саэт, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.
17. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве: утв. Гл. государственным санитарным врачом СССР от 15.05.1990 г., № 5174-90. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 17 с.
18. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова): дисс. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 373 с.
19. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 423 с.
20. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 24 с.
21. Li X.X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: a large-eddy simulation // *Atmos. Environ.* – 2016. – Vol. 144. – P. 47–59. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.060.
22. Aerodynamic properties of rough surfaces with high aspect ratio roughness elements: effect of aspect ratio and arrangements / J. Sadique, X.L.A. Yang, C. Meneveau, R. Mittal // *Bound.-Layer Meteorol.* – 2017. – Vol. 163 (2). – P. 203–224. DOI: 10.1007/s10546-016-0222-1.
23. Володина Д.А. Влияние цементных заводов на эколого-геохимическую обстановку прилегающих территорий на основе изучения снегового покрова: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2024. – 22 с.
24. Содержание токсичных элементов в уличной пыли и оценка риска для здоровья человека (Междуреченск, Южный Кузбасс) / Н.А. Осипова, К.Ю. Осипов, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, Е.А. Филимонов, С.А. Новиков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 229–244. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3974.
25. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы / Н.С. Касимов, Д.В. Власов, Н.Е. Кошелева, Е.М. Никифорова / под ред. Н.С. Касимова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2016. – 276 с.
26. 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
27. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов–примесей в углях. – Ростов-на-Дону: СК НИЦ ВШ, 2002. – 296 с.
28. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
29. Редкоземельные элементы в позднелазовских углях Северной Азии (Сибирь, Северный Китай, Монголия, Казахстан) / С.И. Арбузов, С.С. Ильенко, В.С. Машенькин, Ю. Сунь, Ц. Жао, М.Г. Блохин, В.В. Иванов, Н.В. Зарубина // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 74–88.
30. Янин Е.П. Эмиссия ртути в окружающую среду при производстве кокса в России. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 15 с.

31. Систер В.Г., Корецкий В.Е. Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период. – М.: Изд-во ЦентрМГУИЭ, 2004. – 192 С.
32. Кемеровская мэрия прояснила путаницу с противогололедными материалами // VSE42.RU – Кемерово, Россия, 2025. URL: <https://vse42.ru/news/33604710> (дата обращения 19.04.2025).
33. Extream / Химическая продукция для всех отраслей. – Кемерово, Россия, 2025. URL: <https://extream.ru/> (дата обращения 19.04.2025).
34. Source, spatial distribution and pollution assessment of Pb, Zn, Cu, and Pb, isotopes in urban soils of Ahvaz City, a semi-arid metropolis in southwest Iran / A. Nazarpour, M.J. Watts, A. Madhani, S. Elahi // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – P. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-019-41787-w.
35. Tire and road wear particles in road environment – quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation. / P. Klöckner, T. Reemtsma, P. Eisentraut, U. Braun, A.S. Ruhl, S. Wagner // *Chemosphere*. – 2019. – Vol. 222. – P. 714–721. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.176
36. Antimony in brake pads – a carcinogenic component? / O. Von Uexküll, S. Skerfving, R. Doyle, M. Braungart // *Journal of Cleaner Production*. – 2005. – Vol. 13. – P. 19–31. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2003.10.008
37. Begak O.Y., Syroezhko A.M. Analysis of impurities in mixtures of West-Siberian crude oils // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2001. – Vol. 74 – P. 1230–1234. DOI: 10.1023/A:1013056010056
38. Block C., Dams R. Concentration-data of elements in liquid fuel oils as obtained by neutron activation analysis // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1978. – Vol. 46. – P. 137–144.
39. A comprehensive assessment of heavy metal contamination in road dusts along a hectic national 180 highway of Bangladesh: spatial distribution, sources of contamination, ecological and human health risks / M.H. Kabir, T. Kormoker, R.S. Shammi, T.R. Tusher, M.S. Islam, R. Khan, A.M. Idris // *Toxin Reviews*. – 2022. – Vol. 41. – № 3. – P. 860–879. DOI: 10.1080/15569543.2021.1952436
40. A review of road traffic-derived non-exhaust particles: emissions, physicochemical characteristics, health risks, and mitigation measures / J.C. Fussell, M. Franklin, D.C. Green, M. Gustafsson, R.M. Harrison, W. Hicks, Y. Zhu // *Environmental Science & Technology*. – 2022. – Vol. 56. – № 11. – P. 6813–6835. DOI: 10.1021/acs.est.2c01072.
41. Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres / C.A. Alves, A.M.P. Vicente, A. I. Calvo, D. Baumgardner, F. Amato, X. Querol, C. Pio, M. Gustafsson // *Atmospheric Environment*. – 2020. – Vol. 224. – P. 24–35. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117252.

Информация об авторах

Валерия Дмитриевна Новикова, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; vd10@tpu.ru

Анна Валерьевна Таловская, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; talovskaya@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2227-2221>

Язиков Егор Григорьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; yazikoveg@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7925-6249>

Поступила в редакцию: 28.05.2025

Поступила после рецензирования: 02.06.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

REFERENCES

1. Nygard T., Valkonen T., Vihma T. Characteristics of Arctic low-tropospheric humidity inversions based on radio soundings. *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, vol. 14, pp. 1959–1971. DOI: 10.5194/acp-14-1959-2014.
2. Wetzel C., Brümmer B. An Arctic inversion climatology based on the European Centre Reanalysis ERA-40. *Meteorol. Zeitschrift*, 2011, vol. 20, pp. 589–600. DOI: 10.1127/0941-2948/2011/0295.
3. Atlaskin E., Vihma T. Evaluation of NWP results for wintertime nocturnal boundary-layer temperatures over Europe and Finland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, vol. 138, no. 667. pp. 1440–1451.
4. Simonennkov D.V. *Chemical composition of anthropogenic aerosols over industrial centers of Siberia, the Far East, and Kazakhstan*. Cand. Dis. Tomsk, 2015. 28 p. (In Russ.)
5. Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, vol. 56, no. 6, pp. 709–742. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485.
6. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva, Switzerland, WHO, 2021. 273 p. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/345329> (accessed: 19 April 2025).
7. Sierra-Hernández M.R., Gabrielli P., Beaudon E., Wegner A., Thompson L.G. Atmospheric depositions of natural and anthropogenic trace elements on the Guliya ice cap (northwestern Tibetan Plateau) during the last 340 years. *Atmospheric Environment*, 2018, vol. 176, pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.040.

8. Artamonova S.Yu. Uranium and thorium in aerosol fallout in Novosibirsk and its surroundings (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 212–223. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2731.
9. Lezhenin A.A., Yaroslavtseva T.V., Raputa V.F. Monitoring of aerosol pollution of snow cover based on ground-based and satellite data. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2016, no. 9 (7), pp. 950–959. (In Russ.)
10. Astray B., Šipková A., Baragaño D., Pechar J., Krejci R., Komárek M., Chrástný V. Measuring Pb isotope ratios in fresh snow filtrate refines the apportioning of contaminant sources in the Arctic. *Environmental Pollution*, 2024, vol. 345, 123457. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123457.
11. Tentyukov M.P., Shukurov K.A., Belan B.D., Simonennkov D.V., Ignatiev G.V., Mikhailov V.I. Geochemical markers of stagnant zones in the urban heat island. *Geochemistry*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 90–104. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016752523010089.
12. Dudkina O.A., Minina V.I. Anthropogenic pollution of cities and its impact on the population of the Kemerovo region. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 5, pp. 255–258. (In Russ.)
13. Boyarkina A.P., Baykovsky V.V., Vasiliev N.V., Glukhov G.G., Medvedev M.A., Pisareva L.F., Rezhnikov V.I., Sheludko S.I. *Aerosols in natural tablets of Siberia*. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1993. 157 p. (In Russ.)
14. Kasimov N.S., Kosheleva N.V., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Snow cover geochemistry in the Eastern District of Moscow. *Bulletin of the Moscow University, Series 5: Geograph*, 2012, no. 4, pp. 14–24. (In Russ.)
15. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Environmental geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p. (In Russ.)
16. Revich B.A., Saet Yu.I., Smirnova R.S., Sorokina E.P. *Methodological recommendations for the geochemical assessment of urban territory pollution by chemical elements*. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 111 p. (In Russ.)
17. *Methodological recommendations for assessing the degree of atmospheric air pollution in populated areas by metals based on their content in snow cover and soil*. Approved by the Chief State Sanitary Doctor of the USSR dated 05.15.1990, no. 5174-90. Moscow, IMGRE Publ., 1990. 17 p. (In Russ.)
18. Talovskaya A.V. *Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urbanized areas of southern Siberia (based on the study of the composition of insoluble snow cover sediment)*. Dr. Diss. Tomsk, 2022. 373 p. (In Russ.)
19. Yazikov E.G. *Ecogeochemistry of urbanized territories in the South of Western Siberia*. Dr. Diss. Tomsk, 2006. 423 p. (In Russ.)
20. Shatilov A.Yu. *Material composition and geochemical characteristics of atmospheric precipitation in the territory of the Ob basin*. Cand. Diss. Tomsk, 2001. 24 p. (In Russ.)
21. Li X.X., Britter R., Norford L.K. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: a large-eddy simulation. *Atmospheric Environment*, 2016, vol. 144, pp. 47–59. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.060.
22. Sadique J., Yang X.I.A., Meneveau C., Mittal R. Aerodynamic properties of rough surfaces with high aspect-ratio roughness elements: effect of aspect ratio and arrangements. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, vol. 163, no. 2, pp. 203–224. DOI: 10.1007/s10546-016-0222-1.
23. Volodina D.A. *Influence of cement plants on the ecological and geochemical conditions of adjacent territories based on the study of snow cover*. Cand. Diss. Tomsk, 2024. 22 p. (In Russ.)
24. Osipova N.A., Osipov K.Yu., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Novikov S.A. Content of toxic elements in street dust and health risk assessment (Mezhdurechensk, Southern Kuzbass). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 229–244. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3974.
25. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geochemistry of landscapes in Eastern Moscow*. Moscow, Moscow University Press, 2016. 276 p. (In Russ.)
26. Novikova V.D., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Dynamics of dust load and chemical composition of snow cover in the area of thermal power and coke-chemical enterprises (case study of Kemerovo). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 193–207. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4984.
27. Kizilshstein L.Ya. *Ecogeochemistry of trace elements in coals*. Rostov-on-Don, SK NC VS Publ., 2002. 296 p. (In Russ.)
28. Arbuzov S.I. Metalliferous coals of Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. (In Russ.)
29. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Mashenkin V.S., Sun Yu., Zhao C., Blokhin M.G., Ivanov V.V., Zarubina N.V. Rare earth elements in Late Paleozoic coals of Northern Asia (Siberia, Northern China, Mongolia, Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 74–88. (In Russ.)
30. Yanin E.P. *Mercury in dust emissions from industrial enterprises*. Moscow, IMGRE Publ., 2004. 24 p. (In Russ.)
31. Sister V.G., Koretsky V.E. *Engineering and environmental protection of the water system of a northern metropolis in winter*. Moscow, MGUE Publ., 2004. 192 p. (In Russ.) Available at: <https://vse42.ru/news/33604710> (accessed: 19 April 2025).
32. *Kemerovo mayor's office clarified confusion with anti-icing materials*. VSE42.RU, Kemerovo, Russia, 2025. (In Russ.) Available at: <https://vse42.ru/news/33604710> (accessed: 19 April 2025).
33. *Extream. Chemical products for all industries*. Kemerovo, Russia, 2025. (In Russ.) Available at: <https://extream.ru/> (accessed: 19 April 2025).
34. Nazarpour A., Watts M.J., Madhani A., Elahi S. Source, spatial distribution and pollution assessment of Pb, Zn, Cu, and Pb isotopes in urban soils of Ahvaz City, a semi-arid metropolis in southwest Iran. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41598-019-41787-w.
35. Klöckner P., Reemtsma T., Eisentraut P., Braun U., Ruhl A.S., Wagner S. Tire and road wear particles in road environment – quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation. *Chemosphere*, 2019, vol. 222, pp. 714–721. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.176.
36. Von Uexküll O., Skerfving S., Doyle R., Braungart M. Antimony in brake pads – a carcinogenic component? *Journal of Cleaner Production*, 2005, vol. 13, pp. 19–31. DOI: 10.1016/J.CLEPRO.2003.10.008.
37. Begak O.Y., Syroezhko A.M. Analysis of impurities in mixtures of West-Siberian crude oils. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2001, vol. 74, pp. 1230–1234. DOI: 10.1023/A:1013056010056.

38. Block C., Dams R. Concentration-data of elements in liquid fuel oils as obtained by neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 1978, vol. 46, pp. 137–144.
39. Kabir M.H., Kormoker T., Shammi R.S., Tusher T.R., Islam M.S., Khan R., Idris A.M. A comprehensive assessment of heavy metal contamination in road dusts along a hectic national highway of Bangladesh: Spatial distribution, sources of contamination, ecological and human health risks. *Toxin Reviews*, 2022, vol. 41, no. 3, pp. 860–879. DOI: 10.1080/15569543.2021.1952436.
40. Fussell J.C., Franklin M., Green D.C., Gustafsson M., Harrison R.M., Hicks W., Zhu Y. A review of road traffic-derived non-exhaust particles: emissions, physicochemical characteristics, health risks, and mitigation measures. *Environmental Science & Technology*, 2022, vol. 56, no. 11, pp. 6813–6835. DOI: 10.1021/acs.est.2c01072.
41. Alves C.A., Vicente A.M.P., Calvo A.I., Baumgardner D., Amato F., Querol X., Pio C., Gustafsson M. Physical and chemical properties of non-exhaust particles generated from wear between pavements and tyres. *Atmospheric Environment*, 2020, vol. 224, pp. 24–35. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117252.

Information about the authors

Valeriia D. Novikova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; vdk10@tpu.ru

Anna V. Talovskaya, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; talovskaya@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2227-2221>

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; yazikoveg@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7925-6249>

Received: 28.05.2025

Revised: 02.06.2025

Accepted: 16.06.2025