

УДК 504.3.054
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4984
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Динамика пылевой нагрузки и химического состава снегового покрова в районе расположения предприятий теплоэнергетики и коксохимии (на примере г. Кемерово)

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]vdk10@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью изучения аэротехногенной нагрузки на территории, прилегающие к предприятиям угольной теплоэнергетики и коксохимии, которые являются одним из основных источников поступления твердых частиц в окружающую среду. *Цель:* оценка эколого-геохимического состояния района размещения теплоэлектростанции и коксохимического производства по данным многолетних (2016–2023 гг.) наблюдений уровня пылевой нагрузки и химического состава твердой фазы снегового покрова (на примере г. Кемерово). *Объекты:* твердая фаза снегового покрова, сформированная атмосферными выпадениями, в зоне переноса выбросов на расстоянии до 4,5 км от теплоэлектростанции и коксохимического производства. *Методы:* снегеохимическая съемка; инструментальный нейтронно-активационный анализ; метод атомно-абсорбционной спектрометрии; эколого-геохимические и статистические методы. *Результаты и выводы.* Уровень пылевой нагрузки изменяется от низкого (менее 250 мг/(м²·сут.)) до среднего (250–450 мг/(м²·сут.)) с 2016 по 2023 гг. Выявлена корреляционная зависимость между пылевой нагрузкой и метеопараметрами. Рост пылевой нагрузки связан с увеличением относительной влажности воздуха и количества осадков и со снижением скорости ветра в зимние сезоны. По мере удаления от предприятий наблюдается статистически достоверный низкий уровень пылевой нагрузки на расстоянии до 1 км (в среднем 245 мг/(м²·сут.)), а в пределах 1,5–4,5 км уровень пылевой нагрузки увеличивается (в среднем 381 мг/(м²·сут.)), что может быть связано с влиянием природно-антропогенных факторов. В твердой фазе снегового покрова наиболее интенсивно концентрируются Ba, La, Sm, Tb, Yb, U (выше фона более 10 раз), менее интенсивно – Ca, Sc, Sr, Cs, Ce, Nd, Hf, Ta, Hg, Th (выше фона в 2–10 раз), обуславливающие высокий уровень загрязнения в 2016 и 2022 гг. и средний в 2023 г. Концентрация данных элементов не изменяется на протяжении периода наблюдений, что позволяет рассматривать их как индикаторную группу элементов в твердой фазе снега на изучаемой территории. Статистически достоверно установлено, что на формирование геохимической специфики твердой фазы снега влияют состав угля и золы уноса, объемы потребления топлива и метеопараметры (температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность воздуха, количество осадков).

Ключевые слова: снеговой покров, редкоземельные и радиоактивные элементы, тяжелые металлы, метеопараметры, твердые частицы, теплоэлектростанция, коксохимическое производство

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 Першиной за содействие в 2016 г. в отборе проб снегового покрова, доктору геологу-минералогических наук, профессору отделения геологии Томского политехнического университета Сергею Ивановичу Арбузову за предоставление материалов о составе угля для выполнения сравнительного анализа. Исследования выполнены в НИ Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета среди ведущих мировых исследовательских центров. Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования Учебно-научный центр «Исследовательский ядерный реактор» и Международный инновационный научно-образовательный центр «Урановая геология» имени Л.П. Рихванова Томского политехнического университета.

Для цитирования: 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

UDC 504.3.054
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4984

Dynamics of particulate load and chemical composition of snow cover in the area of thermal power and coke chemistry enterprises (case for the city of Kemerovo)

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

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉vdk10@tpu.ru

Abstract. Relevance. The necessity to investigate aerotechnogenic pollution around coal-fired thermal power and coke-chemical processing plant, which are one of the main sources of particulate matter emissions into the environment. **Aim.** To assess the eco-geochemical conditions of the area around the thermal power station and coke-chemical processing plant based on long-term observations (2016–2023) of particulate load levels and the chemical composition of the particulate phase of snow cover (the case of Kemerovo). **Objects.** The particulate phase of the snow cover formed by atmospheric precipitation in the area of pollutant transfer at a distance of up to 4.5 km from the studied plants. **Methods.** Snow geochemical survey; instrumental neutron activation analysis; atomic absorption spectrometry; statistical analysis. **Results.** The particulate load level ranges from allowable (≤ 250 mg/(m²*day)) to moderately hazardous (250–450 mg/(m²*day)) during the study period. A correlation exists between particulate load and meteorological factors, with increased loads linked to higher humidity, precipitation, and lower wind speeds in winter. The particulate load is statistically lower within 1 km (≈ 245 mg/(m²*day)), while levels rise to 381 mg/(m²*day) between 1.5 and 4.5 km, effected by natural and anthropogenic factors. The snow cover particulate phase shows high Ba, La, Sm, Tb, Yb, U concentration (over 10 times background levels), while Ca, Sc, Sr, Cs, Ce, Nd, Hf, Ta, Hg concentration are 2–10 times above background. This indicates hazardous pollution levels in 2016 and 2022 and moderately hazardous level in 2023. The concentrations of these elements remained unchanged throughout the study period, which allows them to be used as markers for the particulate phases of the snow cover in this area. Interestingly, it was found that the formation of geochemical specifics in particulate snow cover is related to coal composition, fly ash composition, fuel consumption volume, and meteorological factors.

Keywords: snow cover, rare-earth and radioactive elements, heavy metals, meteorological parameters, particulate matter, thermal power plant, coke-chemical processing plant

Acknowledgements: The authors express their gratitude to analysts Aleksandr F. Sudyko and Larisa V. Bogutskaya for their analytical work using instrumental neutron activation analysis. We also thank Nina A. Osipova, Cand. Sc., Associate Professor of the Geology Department at Tomsk Polytechnic University, for her consulting when determining mercury concentration in our samples. Additionally, we extend our thanks to Ekaterina A. Filimonenko and Darya A. Pershina for their assistance in sampling the snow cover in 2016. Finally, we acknowledge the contribution of Sergey I. Arbuzov, Dr. Sc., Professor of the Geology Department at Tomsk Polytechnic University, who provided us with materials on coal composition for our comparative analysis. 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. Dynamics of particulate load and chemical composition of snow cover in the area of thermal power and coke chemistry enterprises (case for the city of Kemerovo). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 193–207. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4984

Введение

Уголь играет значительную роль в мировой энергетике и остается одним из самых востребованных и используемых топливом. Сжигание угля на предприятиях теплоэнергетики является одним из основных источников атмосферного загрязнения [1].

Выбросы, связанные со сжиганием и переработкой угля, содержат большой объем пыли, разнообраз-

ные химические элементы и соединения, которые могут оказывать негативное воздействие на здоровье человека и экосистемы [2–5].

В последние десятилетия ученые уделяют особое внимание изучению тяжелых металлов в твердых частицах атмосферного воздуха в районах расположения угольных теплоэлектростанций и коксохимических предприятий. Например, по данным [6],

кларки концентрации ртути в технологической пыли коксохимического производства достигали 1000 и более единиц, а в технологической пыли (до очистки) коксохимического завода (г. Видное) уровни ее составляли 50 мг/кг. Повышенный пылевывброс, характерный для данного производства, определяет потенциальную опасность загрязнения среды обитания ртутью в районах размещения коксовых заводов [7]. Выбросы теплоэлектростанции также являются источниками поступления ртути [8]. Кроме того, известны работы об исследовании образования и характеристик мелких частиц, на которых концентрируются мышьяк и селен [9]. Существуют работы по изучению полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), концентрирующихся на твердых частицах в атмосферном воздухе и почвах, поступающих от сжигания угля как на теплоэлектростанциях, так и из коксовых печей [10, 11].

Снеговой покров используется многими учеными в исследованиях пылеаэрозольных частиц, позволяя определять их количество, особенности химического состава и пространственного распределения [12–19]. Также по данным изучения снегового покрова можно выявлять пространственные ореолы загрязнения и определять загрязнение территории в конкретный зимний период с устойчивым снежным покровом [20]. Интенсивность загрязнения снегового покрова позволяет определить количество загрязнителей, поступающих во время снеготаяния в поверхностные воды и почвы [21].

В опубликованных исследованиях о районах, подверженных влиянию угольных ТЭЦ, акцент сделан на анализе концентрации полициклических ароматических углеводородов, макроэлементов и тяжелых металлов I, II и III классов опасности в снеговом покрове. Однако значительно меньше внимания уделено изучению уровней концентрации радиоактивных и редкоземельных элементов в снеговом покрове.

По результатам многолетних исследований авторов из г. Томска отмечается, что в составе нерастворимой фракции снежного покрова в окрестностях теплоэлектростанции специфичными элементами являются Na, Ba, Sb, La, Sm, Yb, Lu, U, Ta, Bi, W, As, Fe, Sr [22]. Также авторами [23] установлено, что тяжелые металлы, редкоземельные, редкие и радиоактивные элементы концентрируются преимущественно в твердом осадке снега и только небольшая часть переходит в раствор.

Анализ данных о снеговом покрове [24–26], собранных в процессе мониторинга в районе ТЭЦ г. Новосибирска, подтвердил наличие устойчивых полей аэрозольного загрязнения в данной местности.

В Кемеровской области, которая является основным регионом по добыче угля в стране [27], выполнялись исследования о воздействии уголь-

ных предприятий на окружающую среду и на здоровье человека [28–31]. Город Кемерово, административный центр области, характеризуется наличием промышленных предприятий, которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду [32]. В городе функционируют предприятия теплоэнергетики, коксохимические и химические предприятия, расположенные равномерно в Центральном районе города. Вокруг этого района находится значительное количество жилых массивов. По официальным данным в атмосферном воздухе города периодически наблюдаются превышения ПДК для таких веществ, как бенз(а)пирен, аммиак, взвешенные вещества, водород хлористый, оксид и диоксид азота, диоксид серы, оксид углерода, металлов, углерод (сажи), фенол и формальдегид [32]. Например, в отдельные зимние периоды (2016, 2022, 2023 гг.) среднегодовые концентрации взвешенных веществ фиксировались на уровне ПДКс.с. Изучение токсичности выбросов (угольная пыль, сажа, нафталин, аммиак, сероводород, цианистый водород, бензол, фенол, пиридин) коксохимического производства происходило в период с 1990 по 2000 гг. [33, 34].

Эколого-геохимическая обстановка на территории г. Кемерово изучалась в отдельных районах в разные периоды 1980–1990-х [30] и начала 2000-х гг. [35]. В этих исследованиях фиксировался недостаток данных о масштабе и характере аэротехногенного воздействия предприятий сжигания и переработки угля на основе анализа снегового покрова.

Данная работа направлена на оценку эколого-геохимического состояния района размещения теплоэлектростанции и коксохимического производства в г. Кемерово по данным многолетних (2016–2023 гг.) наблюдений уровня пылевой нагрузки и химического состава твердой фазы снегового покрова с учетом метеорологических параметров, потребления топлива на теплоэлектростанции, химического состава используемого угля и золы уноса.

Материалы и методы

Исследование проводилось на основе проб, отобранных в районе расположения коксохимического завода и теплоэлектростанции г. Кемерово (Россия) в зимние сезоны 2016, 2020, 2022 и 2023 гг. Всего было отобрано 68 проб снегового покрова. Отбор и подготовка проб снегового покрова проводились в соответствии с методическими рекомендациями [36]. Пункты отбора проб размещались в северном, северо-восточном и юго-западном направлениях от предприятий с учетом: 1) преобладающего направления ветра (юго-запад); 2) высоты дымовых труб предприятий; 3) доступности к точке отбора; 4) удаленности от автодорог на 20–25 м и локальных источников загрязнения.

Пробы снежного покрова отбирались на всю глубину снежного покрова за исключением 5 см над почвой, чтобы предотвратить попадание почвы в снеговые пробы. Отбор происходил с помощью пластмассовой лопаты. Отобранные пробы помещались в пластиковые пакеты и завязывались с бирками, на которых были номера проб. После отбора каждой пробы проводилось измерение площади пробоотбора с помощью мерной рулетки.

Отобранные пробы снежного покрова доставлялись в лабораторию, где было проведено несколько этапов пробоподготовки: 1. декантация части снеготалой воды, которая представляет «чистую, без осадка» воду; 2. фильтрация оставшейся части снеготалой воды с осадком через беззольный фильтр типа «синяя» лента; 3. просушивание фильтра с осадком (твердой фазой) при комнатной температуре; 4. просеивание твердой фазы для исключения крупных примесей; 5 взвешивание проб для получения данных о массе твердой фазы.

Анализ проб твердой фазы снежного покрова проводился с использованием современных методов анализа в лабораториях Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» на базе отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Анализ содержания ртути в пробах реализовывался методом атомно-абсорбционной спектроскопии на анализаторе ртути РА-915М с приставкой ПИРО-915+ (предел обнаружения Hg 5 нг/г).

Исследование элементного состава проб проводилось методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) на исследовательском реакторе ИРТ-Т при Томском политехническом университете. ИНАА определяет содержание 26 химических элементов в пробах (Ca, Na, Fe, As, Zn, Nd, Cr, Co, Sb, Br, Ba, Rb, Cs, Sr, Hf, Ta, Sc, Tl, Sm, Eu, La, Ce, Yb, Lu, U, Th). Пробы были облучены тепловыми нейтронами с плотностью потока в канале облучения $2 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·с).

По данным снежного опробования производился расчет показателей загрязнения территории, по публикации некоторых авторов [36, 37].

Пылевая нагрузка (P_n) рассчитывалась по формуле (1):

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

где P_0 – вес твердой фазы снега, мг; S – площадь снегового шурфа, м²; t – количество суток от начала снеговыва до дня отбора проб.

Полученные значения P_n оценивают уровни загрязнения территории по градациям, представленным в [36–39] (табл. 1).

Таблица 1. Градация уровней загрязнения территории по уровню пылевой нагрузки (P_n) и суммарного показателя загрязнения (Z_c)

Table 1. Gradation of pollution levels of the territory according to the level of particulate load (P_n) and the total pollution index (Z_c)

| Уровень загрязнения Pollution level [36–39] | P_n , мг/(м ² ·сут.) mg/(m ² ·day) | Z_c |
|--|---|----------------------------|
| Низкий/Allowable | 100–250 | менее 64 less than 64 |
| Средний/Moderately hazardous | 250–450 | 64–128 |
| Высокий/Hazardous | 450–850 | 128–256 |
| Очень высокий Highly hazardous | ≥850 | более 256 more than 256 |

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 приняты по [13, 40, 41].

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

Суммарный показатель загрязнения (Z_c) снежного 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.

Выполнялось сравнение средних уровней накопления химических элементов также с кларком земной коры [42–45] и кларком ноосферы [46, 47], что отражено в виде фактора обогащения (репер скандий) (ФО) (4) и кларка концентрации (КК) (5), соответственно

$$\Phi O = \frac{(C_x/C_{Sc})_{\text{ТОС}}}{(C_x/C_{Sc})_{\text{з.к.}}}, \quad (4)$$

где C_x – содержание химического элемента в твердой фазе снега и кларк этого химического элемента в земной коре (з.к.), мг/кг; C_{Sc} – содержание скандия в твердой фазе снега и кларк скандия в земной коре (з.к.), мг/кг.

$$K K = \frac{C}{K}, \quad (5)$$

где C – содержание химического элемента в твердой фазе снега, мг/кг; K – кларк ноосферы [46, 47].

Анализ и обработка полученных данных проводились с использованием программного комплекса Statistica.

В твердой фазе снега выявление ассоциаций химических элементов и установление геохимических связей между твердой фазой, углем (данные предоставлены профессором ТПУ С.И. Арбузовым) и золой уноса (данные автора), метеорологическими параметрами (температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность воздуха, количество осадков из метеобазы [48]), потреблением топлива на ГРЭС [49] происходило с помощью корреляционного и кластерного анализа (коэффициент корреляции Пирсона и Спирмена). В дополнение к анализу по элементному составу проб использовался факторный метод. Для проведения корреляционного, кластерного и факторного анализа все значения были стандартизированы.

С помощью коэффициента корреляции (r) мы смогли узнать силу корреляционных взаимосвязей в выборках, где по принятым шкалам, оценки Харрингтона, признак очень слабой взаимосвязи соответствует менее 0,2, признак слабой связи соответствует диапазону 0,2–0,37, средняя взаимосвязь относится к значениям в границах 0,37–0,63, к высокой корреляционной связи относятся значения от 0,63 до 0,8, а к очень высокой взаимосвязи относятся значения в диапазоне 0,8–1 [50].

Результаты и обсуждения

Уровень пылевой нагрузки

На рис. 1 приведены данные по динамике уровня пылевой нагрузки в зимние периоды наблюдений 2016, 2022, 2023 гг. Определен низкий уровень пылевого загрязнения снегового покрова в 2016 г. по градации, показанной в табл. 1. В 2022 и 2023 гг. сформирован средний уровень загрязнения.

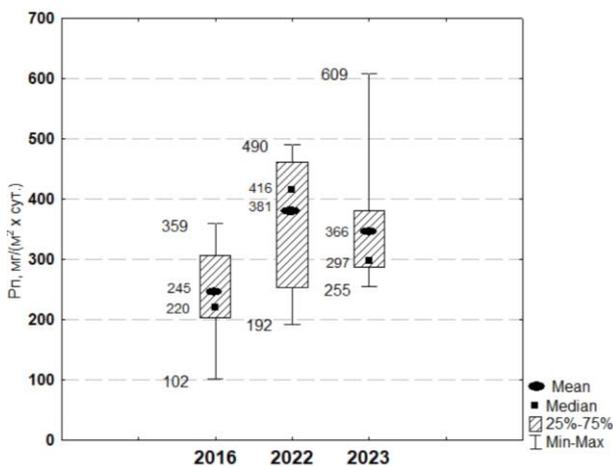


Рис. 1. Диаграмма размаха уровней пылевой нагрузки в 2016, 2022 и 2023 гг. по данным исследования снегового покрова в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии

Fig. 1. Diagram of the range of particulate load level in 2016, 2022 and 2023 according to a study of snow cover around thermal power plant and coke-chemical processing plant

По результатам корреляционного анализа метеопараметры оказали влияние на формирование пылевой нагрузки в течение периода наблюдений. Определена статистически высоко значимая корреляционная зависимость между пылевой нагрузкой, относительной влажностью воздуха и осадками (табл. 2). Отрицательная корреляционная связь выявлена между пылевой нагрузкой и скоростью ветра, что указывает на повышение пылевой нагрузки с 2016 по 2023 гг. при снижении скорости ветра в этот период. Между пылевой нагрузкой и температурой воздуха корреляционная связь не была выделена.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции (r) в системе «пылевая нагрузка – метеопараметры»

Table 2. Correlation coefficients (r) in the "particulate load – meteorological parameters" system

| Пылевая нагрузка (Pn, мг/(м²·сут.)) – метеопараметры Particulate load (Pn, mg/(m²·day)) – meteorological parameters | Значения r r value | Тип связи Type of connection |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| Pn – Температура воздуха Temperature (°C) | 0,2 | Слабая/Low |
| Pn – Скорость ветра (м/с) Wind speed (m/sec) | -0,69 | Высокая/High |
| Pn – Относительная влажность воздуха (г/м³) Humidity (gr/m³) | 0,75 | |
| Pn – Сумма осадков (мм) Precipitation amount (mm) | 0,87 | Очень высокая Very high |

Определено, что в 2016 г. в исследуемом районе уровень пылевой нагрузки был статистически достоверно низким из-за небольшого количества осадков и высокой скорости ветра в сравнении с другими годами. В 2022 г. уровень нагрузки значительно превысил показатели других периодов наблюдений, поскольку зимнее количество осадков оказалось более высоким (2016 г. – 130 мм, 2022 г. – 155 мм, 2023 г. – 140 мм [48]).

В работах [51–54] показано, что в условиях высокой относительной влажности воздуха твердые частицы сильнее коагулируются, что приводит к быстрому осаждению загрязняющих веществ, и вымываются осадками.

Определены статистически значимые высокие значения пылевой нагрузки в северном и северо-восточном (подветренных) направлениях от изучаемых предприятий по сравнению с нагрузкой в юго-западной (наветренной) стороне.

В северном и северо-восточном направлениях от предприятий наблюдается увеличение пылевой нагрузки по мере удаления от границ предприятий до 4,5 км. Статистически значимо низкие значения пылевой нагрузки отмечаются на расстоянии до 1 км (рис. 2).

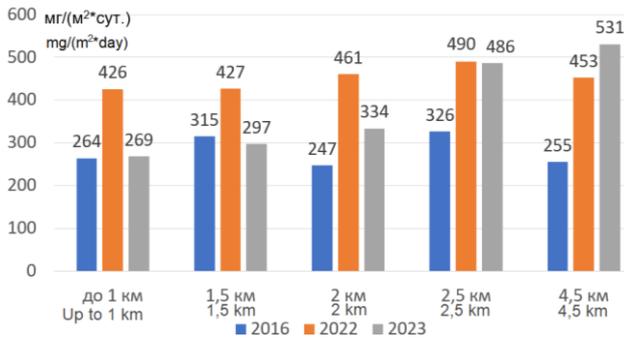


Рис. 2. Диаграмма распределения пылевой нагрузки по мере удаления от промышленных предприятий

Fig. 2. Diagram of the distribution of particulate load as it moves away from the industries

С подветренной стороны на расстоянии до 1 км от предприятий расположена долина реки Томи. Исследования, проведенные учеными [26], продемонстрировали изменения в направлениях и скоростях ветра, которые могут влиять как на накопление, так и на транспортировку загрязняющих веществ в нижних слоях атмосферы на территориях, прилегающих к крупным рекам.

В север-северо-восточном направлении на расстоянии от 1,5 до 2 км наблюдается увеличение уровня пылевой нагрузки (среднее 346 мг/(м²*сут.)). Это связано с расположением в этом районе исследования низкоэтажной застройки, такой, как частный сектор. Стоит отметить, что на данном расстоянии расположена также лесопарковая зона с древесной растительностью, которая способствует более интенсивному накоплению пыли в снеговом покрове под кронами деревьев [55–57].

На расстоянии 2,5–4,5 км от предприятий в зоне расположения высокоэтажной застройки уровень пылевой нагрузки возрастает в 1,5 раза и в среднем составляет 434 мг/(м²*сут.). Высокоэтажная застройка является барьером для переноса пылевых частиц, что способствует их наибольшему осаждению на снеговой покров в данном районе. В работах [36, 58] показано, что высотная застройка городов формирует особый микроклимат и «городской каньон». Это приводит к турбулентным колебаниям скорости ветра и создает геохимическую неоднородность за счет перераспределения потоков атмосферных загрязняющих веществ и формирования зон седиментации в городских почвах и других средах осаждения [36].

В зоне влияния исследуемых предприятий до 2,5 км не исключается дополнительный вклад локальных источников в формирование уровня пылевой нагрузки, таких как печное отопление в частном секторе. Наши исследования показали, что уровень пылевой нагрузки статистически значимо ниже в 3–7 раз в частном секторе с печным отопле-

нием (среднее 61 мг/(м²*сут.)) и жилым районе с высотной застройкой, расположенных в южной и юго-восточной частях города вне зоны влияния изучаемых предприятий (среднее 146 мг/(м²*сут.)). Это свидетельствует о незначительном влиянии печного отопления на общую пылевую нагрузку.

Немаловажный вклад в распределение пылевой нагрузки в районе исследования вносит высота дымовых труб на изучаемых предприятиях. Предприятие теплоэнергетики имеет высоту труб от 180 до 210 м, и перенос загрязняющих веществ в атмосфере может достигать 5 км [59]. Для предприятия коксохимии характерна небольшая высота труб (до 80 м), что способствует оседанию веществ вблизи источников [60]. Поэтому подфакельная площадь загрязнения снегового покрова вблизи завода, вероятно, будет выше, чем на дальних расстояниях.

Средняя величина пылевой нагрузки вблизи предприятий теплоэнергетики и коксохимии (331 мг/(м²*сут.)) более чем в 3 раза выше пылевой нагрузки на схожих территориях в г. Москве (27 мг/(м²*сут.) [36]), Новосибирске (98 мг/(м²*сут.) [25]), Томске (56 мг/(м²*сут.) [41]), Тобольске (17 мг/(м²*сут.) [61]), близко к уровню в г. Улан-Удэ (331 мг/(м²*сут.) [62]).

Химический состав твердой фазы снегового покрова

Числовые характеристики коэффициентов концентраций химических элементов в период с 2016 по 2023 гг. в пробах твердой фазы снега в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово представлены на диаграмме размаха (рис. 3).

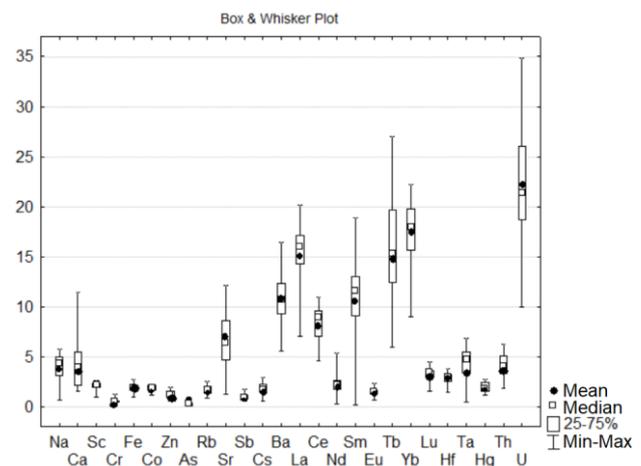


Рис. 3. Диаграмма размаха коэффициентов концентраций химических элементов в твердой фазе снегового покрова в период с 2016 по 2023 г.г.

Fig. 3. Diagram of the range of concentration coefficient of chemical elements in the particulate phase of the snow cover in the period from 2016 to 2023

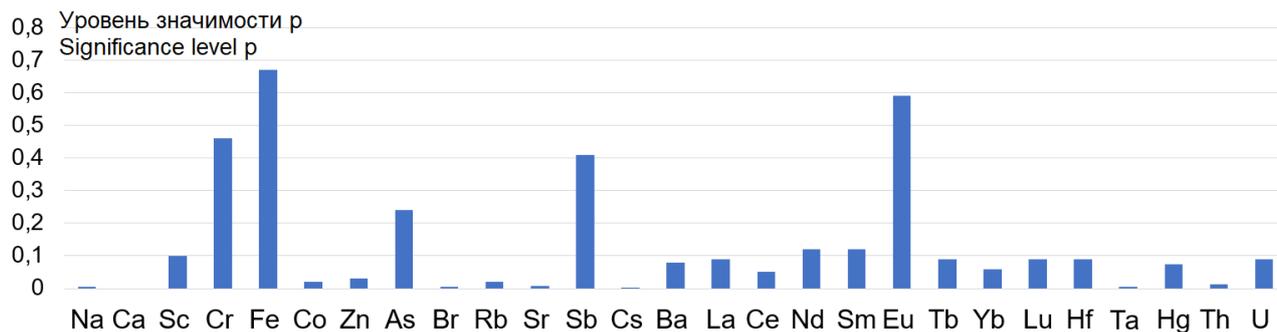


Рис. 4. Уровень значимости различия выборок p по содержанию химических элементов в пробах (с 2016 по 2023 гг., статистический критерий Краскела–Уоллеса)

Fig. 4. Significance level of the difference in p samples in terms of the content of chemical elements in the samples (from 2016 to 2023, the statistical criterion of Kraskel–Wallis)

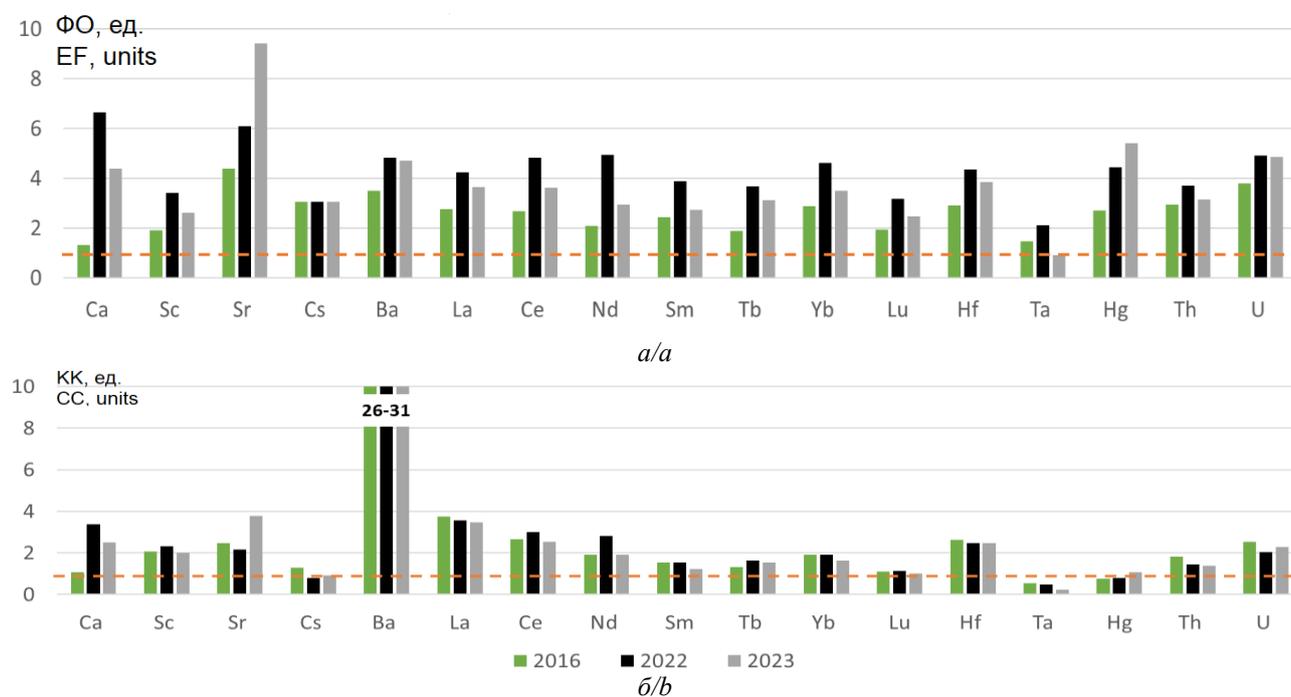


Рис. 5. Диаграммы содержания элементов в пробах относительно кларков земной коры и ноосферы: а) фактор обогащения; б) кларка концентрации в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики и коксохимии в период с 2016 по 2023 гг.

Fig. 5. Diagrams of element content in the samples relative to clark of Earth crust and noosphere: а) enrichment factor; б) clark of concentration in the impacted area around the thermal power plant and coke-chemical processing plant for 2016–2023

По критерию Краскела–Уоллеса концентрации Ca, Sc, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U в твердой фазе снегового покрова статистически достоверного не различаются (при $p \geq 0,1$) на протяжении 2016, 2022 и 2023 гг. (рис. 4). В динамике геохимических особенностей состава твердой фазы снегового покрова концентрации данного спектра элементов остаются повышенными относительно фона, кларка земной коры и кларка ноосферы от 2 до 25 раз (рис. 4, 5).

В зоне воздействия предприятий теплоэнергетики и коксохимии на протяжении 2016, 2022 и 2023 гг. по

значениям коэффициентов концентраций элементов была выявлена степень интенсивности накопления элементов в твердой фазе снега (табл. 3). Наиболее интенсивно ($K_c > 10$) концентрируются в твердой фазе снега такие элементы, как Ba, La, Sm, Tb, Yb, U. Менее интенсивно ($K_c = 2–10$) концентрируются в пробах Ca, Sc, Sr, Cs, Ce, Nd, Hf, Ta, Hg, Th. Близко к фоновым концентрациями ($K_c < 1,5$) выделяются Cr, Fe, Co, Zn, As, Rb, Sb, Cs, Eu. Данный геохимический спектр элементов формирует высокий уровень загрязнения в 2016 и 2022 гг. по градации в табл. 3. Средний уровень загрязнения отмечается в 2023 г.

Таблица 3. Геохимические ряды химических элементов в твердой фазе снегового покрова и суммарный показатель загрязнения (Z_c) в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики и коксохимии в период с 2016 по 2023 гг.

Table 3. Geochemical rows of chemical elements in the particulate phase of snow cover and the total pollution index (Z_c) in the impacted area around the thermal power plant and coke-chemical processing plant in the period from 2016 to 2023

| Год Year | Геохимические ряды по коэффициентам концентраций (Kc) Geochemical rows according to concentration coefficient (Kc) | Z_c |
|-------------|--|-------|
| 2016 | U₂₄-Yb₁₈-La₁₆-Tb₁₄-Sm₁₂-Ba₁₁-Ce_{8,2}-Sr₆-Ta₅-Th_{4,8}-Lu_{3,3}-Hf₃-Cs_{2,2}-Ca_{2,1}-Nd₂-Sc₂-Hg-Fe_{1,9}-Rb_{1,8}-Co_{1,7}-Eu_{1,4}-Zn_{1,2}-Sb_{0,9}-Cr_{0,5}-As_{0,3} | 129 |
| 2022 | U₁₉-Yb₁₈-Tb₁₇-La₁₅-Sm₁₁-Ba₁₀-Ce_{9,3}-Ca_{6,6}-Sr_{5,2}-Ta_{4,7}-Th_{3,8}-Lu_{3,4}-Nd₃-Hf_{2,8}-Sc_{2,3}-Hg₂-Co_{1,9}-Fe_{1,8}-Eu_{1,4}-Rb_{1,4}-Cs_{1,4}-Zn_{1,3}-Sb_{1,1}-Cr_{0,5}-As_{0,2} | 128 |
| 2023 | U₂₂-Tb₁₆-Yb₁₅-La₁₅-Ba₁₁-Sm_{9,2}-Sr_{9,1}-Ce_{7,9}-Ca_{4,9}-Th_{3,6}-Lu₃-Hf_{2,8}-Hg_{2,6}-Ta_{2,3}-Nd₂-Sc₂-Co₂-Fe_{1,9}-Eu_{1,6}-Rb_{1,6}-Cs_{1,6}-Zn_{1,5}-Sb_{0,9}-Cr_{0,6}-As_{0,3} | 122 |

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

Note: the subscripts are Kc 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.

Результаты кластерного анализа показали, что в течение трех лет наблюдений формируется устойчивый кластер геохимической ассоциации элементов La-Hf-Yb-Sc-Lu-Ce, что может свидетельствовать о постоянном источнике загрязнения (рис. 6).

По результатам исследований выделена индикаторная группа элементов (Ca, Sc, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U) в твердой фазе снегового покрова, сохраняющая концентрации в течение периода наблюдений. Стабильность концентрирования группы элементов в пробах связана с составом угля, золы уноса, потреблением топлива на теплоэлектростанции, что подтверждается результатами корреляционного анализа.

Между элементным составом твердой фазы снега, углей, золы уноса и потреблением топлива на ГРЭС выявлена высокая корреляционная зависимость (табл. 4).

Между концентрациями элементов U, Tb, Fe, Eu, Yb, Sr в твердой фазе снега и углях выявлена средняя и высокая корреляционная взаимосвязь. В системе «твердая фаза снега – зола уноса – потребление топлива на ГРЭС» отмечается высокая и очень высокая связь для концентрации большинства изучаемых элементов (табл. 4).

Геохимический спектр элементов отражает специфику состава твердой фазы снега в районе изучаемых предприятий и имеет высокую и очень высокую

корреляционную связь с составом золы уноса. Кузнецкие угли специализированы на U, Th, лантаноидах, а также содержат тяжелые металлы [63, 64].

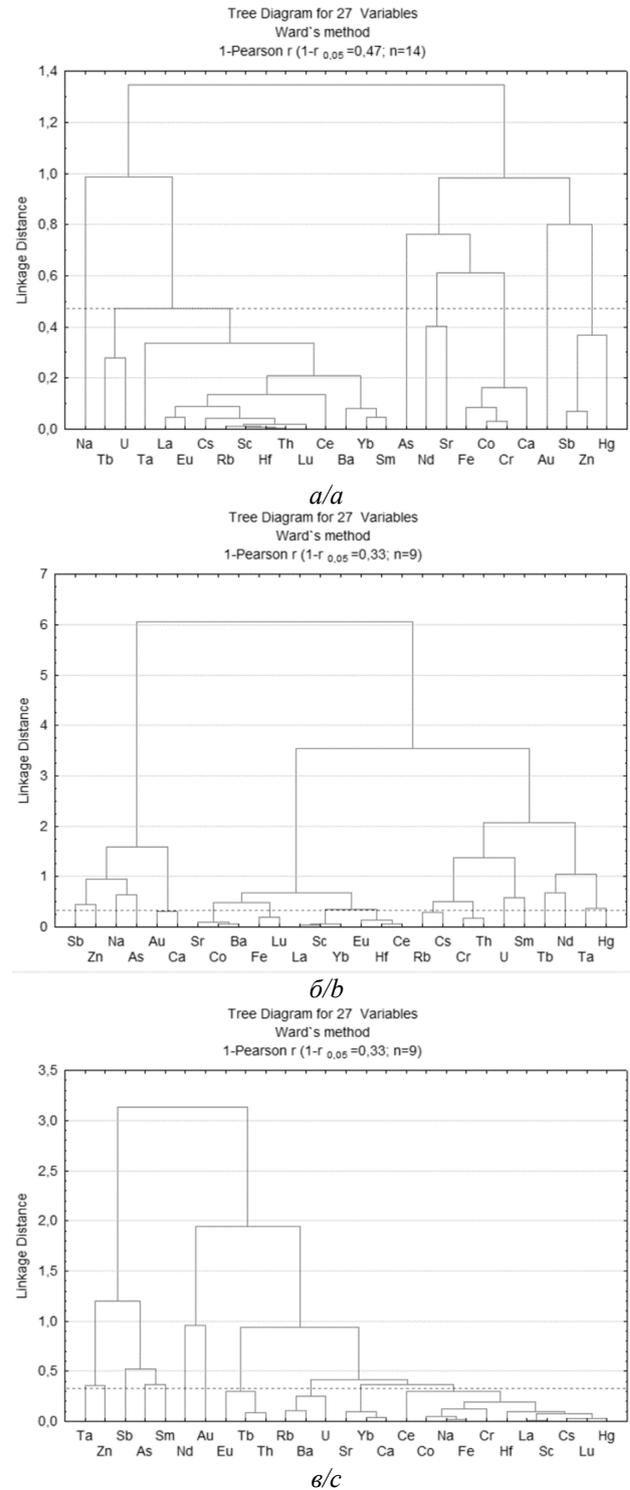


Рис. 6. Дендрограммы корреляционной матрицы геохимического спектра элементов проб твердой фазы снега: а) 2016 г.; б) 2022 г.; в) 2023 г.

Fig. 6. Dendrogram of the correlation matrix of the geochemical spectrum of elements in the particulate phase of snow cover samples: a) 2016; b) 2022; c) 2023

Таблица 4. Корреляционная зависимость содержаний элементов в системе «твердая фаза снега – уголь – зола уноса – потребление топлива на ГРЭС»

Table 4. Correlation dependence of the element contents in the "particulate phase of snow cover – coal – fly ash – fuel consumption at GRES" system

| Значения r* r* value | 0,2–0,37 | 0,37–0,63 | 0,63–0,8 | 0,8–1 |
|--|---------------|--------------------|------------------------|---|
| Тип связи* Type of connection | Слабая Low | Средняя Medium | Высокая High | очень высокая Very high |
| Твердая фаза снега – уголь Particulate phase of snow cover – coal | | | | |
| Элементы Elements | Hf, Ta | Fe, Eu, Tb, U | Sr, Yb | – |
| Твердая фаза снега – зола уноса Particulate phase of snow cover – fly ash | | | | |
| Элементы Elements | – | Na, As, Rb, Sm | Ca, Sc, Fe, Cs, Ta, Th | Cr, Co, Zn, Sr, Sb, Ba, La, Ce, Nd, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, U |
| Твердая фаза снега – потребление топлива на ГРЭС Particulate phase of snow cover – fuel consumption at GRES | | | | |
| Элементы Elements | Zn | Cs, La, Ce, Eu, Th | Tb | Na, Ca, Sc, Cr, Fe, Co, As, Rb, Sr, Sb, Ba, Sm, Yb, Ta, Hf, U |

Примечание: *вербально-числовая шкала Харрингтона [50].
Note: *Harrington's verbal-numerical scale [50].

В процессе сжигания угля образуется дымовой газ, в котором сопутствующими элементами являются Hg, As, Вг. Многие элементы фиксируются в составе тонкодисперсной пылевой фракции выбросов [65].

В снеговом покрове в зоне воздействия ТЭЦ г. Новосибирска для As, Вг преобладает растворенная форма, а для К, Ca, Rb, Y, Zr, Nb, Th и др. – взвешенная [66]. В нерастворимой фазе снега г. Иркутска содержатся V, Cr, Fe, Ni, Cu, Sr (>80 % от общего содержания) [67]. Коксохимическое производство является источником эмиссии ртути в окружающую среду [6, 37, 68].

Элементы-индикаторы, выделенные в составе твердой фазы снега, отражают сильную положительную корреляционную зависимость от температуры воздуха, скорости ветра и количества осадков. В то же время установлены отрицательные корреляционные связи между содержанием в твердой фазе снега Sm, Lu, Yb, Ta, Ce и температурой воздуха; Hg и Sr – со скоростью ветра; Lu, Hf, La, Th, Yb, Ta – с относительной влажностью воздуха; U, Hf, Ba, Cs – с количеством осадков (табл. 5).

Приведены результаты многофакторного анализа по методу главных компонентов для данных за 2016–2023 гг. по концентрациям элементов проб твердой фазы снега и метеоданным (табл. 6). Распределение данных по факторам происходит в зависимости от коэффициента корреляции, который превышает 0,7, что доказывает достоверную связь.

Первый фактор обусловлен 70 % дисперсии распределения содержания химических элементов в твердой фазе снега и метеопараметров. Второй фактор отвечает за 30 % дисперсии содержания элементов и метеопараметров.

Таблица 5. Корреляционная зависимость элементов-индикаторов в системе «твердая фаза снега – метеопараметры»

Table 5. Correlation dependence of indicator elements in the "particulate phase of snow cover – meteorological parameters" system

| Элемент Element | Концентрация элемента/Element concentration | | | |
|--------------------|---|------------------------------|---|-------------------------|
| | температура воздуха temperature | скорость ветра wind speed | относительная влажность воздуха humidity | осадки precipitation |
| Ca | -0,08 | -0,5 | 0,54 | 0,97 |
| Sc | -0,79 | 0,3 | -0,26 | 0,84 |
| Sr | 1,00 | -0,9 | 0,82 | -0,30 |
| Cs | -0,09 | 0,6 | -0,68 | -0,91 |
| Ba | 0,38 | 0,2 | -0,26 | -1,00 |
| La | -0,64 | 0,9 | -0,97 | -0,52 |
| Ce | -0,83 | 0,4 | -0,33 | 0,80 |
| Nd | -0,69 | 0,2 | -0,11 | 0,91 |
| Sm | -0,98 | 0,9 | 0,91 | 0,1 |
| Tb | 0,05 | -0,6 | 0,65 | 0,92 |
| Yb | -0,98 | 0,9 | -0,89 | 0,16 |
| Lu | -1 | 0,9 | -0,83 | -0,27 |
| Hf | -0,29 | 0,8 | -0,81 | -0,80 |
| Ta | -0,93 | 1,0 | -0,97 | -0,05 |
| Hg | 0,96 | -1,0 | 0,94 | -0,04 |
| Th | -0,41 | 0,8 | -0,88 | -0,72 |
| U | 0,22 | 0,3 | -0,41 | -0,99 |

Примечание: полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции ($p > 0,95$), данные по метеопараметрам [48].

Note: significant correlation coefficients ($p > 0,95$) and data on meteorological parameters are highlighted in bold [48].

Таблица 6. Факторный анализ взаимосвязи содержания элементов в твердой фазе снежного покрова и метеопараметров

Table 6. Factor analysis of the relationship between the content of elements in the particulate phase of snow cover and meteorological parameters

| № фактора Factor number | Элементы Elements | Переменные, определяющие фактор Variables determining factors | Вес фактора Factor weight, % |
|----------------------------|--|---|---------------------------------|
| 1 | Na, Cr, Fe, Zn, As, Rb, Sr, Sb, Cs, Tb, Ta | Температура воздуха Temperature Скорость ветра Wind speed | 70 |
| 2 | Ca, Sc, Co, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Yb, Lu, Hf, Th, U | Скорость ветра Wind speed Относительная влажность воздуха Humidity | 30 |

Примечание: полужирным шрифтом выделены индикаторные элементы в твердой фазе снега для района исследования.

Note: indicator elements in the particulate phase of snow for the study area are highlighted in bold.

По результатам факторного анализа (табл. 6) была выделена такая же взаимосвязь между температурой воздуха, скоростью ветра, относительной влажностью воздуха и концентрацией элементов в разные периоды наблюдений, что подтверждает влияние метеорологического фактора на формирование геохимических особенностей твердой фазы снегового покрова.

Заключение

Проведенное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. В период наблюдений с 2016 по 2023 гг. пылевая нагрузка в среднем варьируется от 245 до 381 мг/(м²*сут.), что соответствует изменению от низкого до среднего уровня загрязнения. На неоднородность распределения пылевой нагрузки по годам влияют метеопараметры. При увеличении относительной влажности воздуха и количества осадков наблюдается рост пылевой нагрузки, при снижении скорости ветра уровень пылевой нагрузки также возрастает. По мере удаления в северо-восточном направлении от предприятий уровень пылевой нагрузки на расстоянии от 1,5 до 4,5 км выше, чем на территории, находящейся до 1 км от них. Рост пылевой нагрузки с увеличением расстояния от предприятий связан как с природными (ветровые потоки вблизи реки, лесопарковая зона), так и антропогенными (высота застройки зданий) факторами.
2. В твердой фазе снега из 27 изучаемых элементов уровни концентраций 17 элементов (Ca, Sc,

Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U) не изменяются на протяжении периода наблюдений. Превышение фоновых концентраций данных элементов фиксируется от 2 до 24 раз, что отражает геохимическую специфику состава твердой фазы снега на изучаемой территории. На протяжении трех лет в пробах сохраняется устойчивая геохимическая ассоциация с высокими корреляционными взаимосвязями между элементами Sc-La-Ce-Yb-Lu-Hf.

3. Статистически достоверно определено, что концентрации выделенной индикаторной группы элементов в пробах имеют высокую корреляционную связь с составом угля, золы уноса и объемами потребления топлива на ГРЭС, что свидетельствует о влиянии данных факторов на формирование геохимической специфики твердой фазы снега. Дополнительными факторами, влияющими на накопление индикаторной группы элементов в твердой фазе снега, являются такие метеорологические параметры, как температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность воздуха и количество осадков.

Таким образом, совокупность природных (метеорологические параметры, городской рельеф местности) и антропогенных (состав и потребление топлива, состав золы уноса, высота жилой постройки и дымовых труб предприятий) факторов оказывает значительное влияние на формирование пылевой нагрузки и геохимической специфики состава твердой фазы снега в районе расположения предприятий теплоэнергетики и коксохимии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов С.А. Угольная промышленность. Загрязнение окружающей среды при улучшении качественных характеристик угля // Вестник науки и образования. – 2024. – № 3 (146). – С. 16–19.
2. Systematic characterization of selenium speciation in coal fly ash / E. Garcia, P. Liu, S.E. Bone, Y. Wen, Y. Tang // Environmental Science: Processes & Impacts. – 2024. – Vol. 26 (12). – P. 2240–2249. DOI: 10.1039/d4em00398e.
3. A regional study to evaluate the impact of coal-fired power plants on lung cancer incident rates / O. Ige, I. Ratnayake, J. Martinez, S. Pepper, A. Alsup, M. McGuirk, B. Gajewski, D.P. Mudaranthakam // Journal of Cancer Epidemiology and Prevention. – 2024. – Vol. 2 (1). – 2348469. DOI: 10.1080/28322134.2024.2348469.
4. Vig N., Khaiwal R., Mor S. Environmental impacts of Indian coal thermal power plants and associated human health risk to the nearby residential communities: a potential review // Chemosphere. – 2023. – Vol. 341. – 140103. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140103.
5. Ревич Б.А. К оценке влияния деятельности ТЭК на качество окружающей среды и здоровье населения // Проблемы прогнозирования. – 2010. – № 4. – С. 87–99.
6. Янин Е.П. Ртуть в пылевых выбросах промышленных предприятий. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 24 с.
7. Волох А.А. Опыт контроля за загрязнением атмосферного воздуха металлами и летучими органическими соединениями на городских и фоновых территориях // Геохимические исследования городских агломераций. – М.: ИМГРЭ, 1998. – С. 40–58.
8. Bibliometric analysis on mercury emissions from coal-fired power plants: a systematic review and future prospect / Q. Liu, J. Gao, G. Li, Y. Zheng, R. Li, T. Yue // Environmental Science and Pollution Research. – 2024. – Vol. 31 (13). – P. 19148–19165. DOI: 10.1007/s11356-024-32369-z.
9. Fine particulate-bound arsenic and selenium from coal-fired power plants: Formation, removal and bioaccessibility / Y. Huang, H. Hu, B. Fu, C. Zou, H. Liu, X. Liu, L. Wang, G. Luo, H. Yao // Science of the Total Environment. – 2022. – 823:153723. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153723.
10. Spatial distribution, environmental behavior, and health risk assessment of PAHs in soils at prototype coking plants in Shanxi, China: stable carbon isotope and molecular composition analyses / X. Liu, X. Tan, X. Li, Y. Cheng, K. Wang // Journal of Hazardous Materials. – 2024. – 468:133802. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133802.

11. Emission characteristics of PM_{2.5} and components of condensable particulate matter from coal-fired industrial plants / Y. Wu, Z. Xu, S. Liu, M. Tang, S. Lu // *Science of the Total Environment*. – 2021. – 796:148782. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148782.
12. Аэрозоли в природных ландшафтах Сибири / А.П. Бояркина, В.В. Байковский, Н.В. Васильев и др. – Томск: Изд-во ТГУ, 1993. – 157 с.
13. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2006. – 423 с.
14. 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. Chrástný // *Environmental Pollution*. – 2024. – Vol. 345. – 123457. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123457.
15. The content and sources of potentially toxic elements in the road dust of Surgut (Russia) / D. Moskovchenko, R. Pozhitkov, A. Soromotin, V. Tyurin // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13 (30). – P. 1–19. DOI: 10.3390/atmos13010030.
16. Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Y., Soromotin A.V. Snow contamination by metals and metalloids in a polar town: a case study of Nadym, Russia // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2024. – Vol. 86. – P. 304–324. DOI: 10.1007/s00244-024-01057-x.
17. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: partitioning and deposition rates in western Moscow / D. Vlasov, J. Vasil'chuk, N. Kosheleva, N. Kasimov // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11 (9). – 907. DOI: 10.3390/atmos11090907.
18. Winter atmospheric deposition of trace elements in the Arkhangelsk region (NW Russia): Insights into environmental effects / D.P. Starodymova, E.I. Kotova, V.P. Shevchenko, K.V. Titova, O.N. Lukyanova // *Atmospheric Pollution Research*. – 2024. – Vol. 15 (12). – 102310. DOI: 10.1016/j.apr.2024.102310.
19. Минералого-геохимические особенности снежного покрова на антропогенно нарушенных территориях Надым-Пуровского междуречья (север Западной Сибири) / А.Ю. Опекунов, М.Г. Опекунова, С.Ю. Кукушкин, С.Ю. Янсон // *Вестник Московского университета*. – 2024. – Серия 5. География. – № 3. – С. 17–31. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.2.
20. Анализ данных наблюдений аэрозольного загрязнения снежного покрова в окрестностях Томска и Северска / В.Ф. Рапуга, А.В. Таловская, В.В. Коковкин, Е.Г. Язиков // *Оптика атмосферы и океана*. – 2011. – Т. 24. – № 1. – С. 74–78.
21. Касимов Н.С. Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. – 336 с.
22. Таловская А.В., Филимоненко Е.А., Язиков Е.Г. Динамика элементного состава снежного покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // *Оптика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 27. – № 6. – С. 491–495.
23. Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В. Минералогия техногенных образований: учебное пособие для академического бакалавриата. – М.: Юрайт, 2016. – 160 с.
24. Методы анализа данных загрязнения снежного покрова в зонах влияния промышленных предприятий (на примере г. Новосибирск) / С.Б. Бортникова, В.Ф. Рапуга, А.Ю. Девятова, Ф.Н. Юдахин // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2009. – № 6. – С. 515–525.
25. 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.
26. Леженин А.А., Ярославцева Т.В., Рапуга 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.
27. Распоряжение Правительства РФ от 06.10.2021 N 2816-р. – М: Собр. законодательства РФ, 2021. – 6 с.
28. 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.
29. Заболеваемость населения Кемеровской области раком лёгкого и раком желудка с 1996 г. по 2015 г. / С.А. Ларин, С.А. Мун, В.В. Браиловский, Ю.А. Магарилл, А.Н. Попов, Н.А. Ерёмкина // *Фундаментальная и клиническая медицина*. – 2017. – № 2 (2). – С. 43–51.
30. Некипелый В.Л., Немтина Н.И., Некипелая С.А. Геолого-экологическая карта города Новокузнецка и пригородной зоны: отчет по геолого-экологическим исследованиям города Новокузнецка и пригородной зоны, проведенным в 1993–96 гг. – Новокузнецк: Изд-во ТОО «Кузбассэкоцентр», 1998. – Т. 2. – 557 с.
31. Загрязнение снежного покрова полициклическими ароматическими углеводородами и токсичными элементами на примере г. Новокузнецка / Н.В. Журавлева, Р.Р. Потокина, З.Р. Исмагилов, Е.Р. Хабибулина // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2014. – Т. 22. – № 5. – С. 445–454.
32. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2020 и 2023 году. – Кемерово, 2023. URL: <http://kuzbasseco.ru/doklady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/> (дата обращения 20.05.2024).
33. Защита атмосферы при модернизации коксохимического завода / Б.Д. Зубицкий, В.Б. Ляпип, А.И. Гаус, В.Г. Назаров // *Кокс и химия*. – 1997. – № 4. – С. 37–39.
34. Эколого-гигиенические проблемы городов с развитой химической промышленностью / А.П. Михайлуц, В.Н. Зайцев, С.В. Иванов, Б.Д. Зубицкий. – Новосибирск: ЦЭРИС, 1997. – 191 с.
35. Журавлев Н.М., Клем-Мусатова И.К., Чурашев В.Н. Оценка влияния предприятий Сибири и Дальнего Востока на окружающую среду // *Регион: Экономика и социология*. – 2002. – № 4. – С. 88–102.
36. 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.
37. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 335 с.
38. 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.

39. 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.
40. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 24 с.
41. 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.
42. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1995. – Vol. 59. – № 7. – P. 1217–1232. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00038-2.
43. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on geochemistry*. – Elsevier Science. – 2003. – Vol. 3. – P. 1–64. DOI: 10.1016/b0-08-043751-6/03016-4.
44. Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: a revision and update // *Chemical Geology*. – 2008. – Vol. 253 (3–4). – P. 205–221. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010.
45. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, 2009. – 383 с.
46. Глазовский Н.Ф. Техногенные потоки вещества в биосфере // *Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем*. – М.: Наука, 1982. – С. 7–28.
47. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.
48. Архив погоды в России // Архив погоды в Кемерово. URL: <https://world-weather.ru/archive/russia/kemerovo/> (дата обращения 20.05.2024).
49. Схема теплоснабжения города Кемерово до 2033 года (актуализация на 2020 год). Обосновывающие материалы. Глава 10 Перспективные топливные балансы. – Кемерово, 2020. URL: <https://kemerovo.ru/sfery-deyatelnosti/gorodskoe-zhkhk/skhema-teplosnabzheniya-goroda-kemerovo-do-2033-goda> (дата обращения 20.05.2024).
50. Адлер Ю.А., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 140 с.
51. Effects of aqueous-phase and photochemical processing on secondary organic aerosol formation and evolution in Beijing, China / W. Xu, T. Han, W. Du, Q. Wang, C. Chen, J. Zhao, Y. Zhang, J. Li, P. Fu, Z. Wang // *Environmental Science & Technology*. – 2017. – Vol. 51 (2). – P. 762–770. DOI: 10.1021/acs.est.6b04498.
52. Photochemical aqueous-phase reactions induce rapid daytime formation of oxygenated organic aerosol on the North China Plain / Y. Kuang, Y. He, W. Xu, B. Yuan, G. Zhang, Z. Ma, C. Wu, C. Wang, S. Wang, S. Zhang, J. Tao, N. Ma, H. Su, Y. Cheng, M. Shao // *Environmental Science & Technology*. – 2020. – Vol. 54. – № 7. – P. 3849–3860. DOI: 10.1021/acs.est.9b06836.
53. Spatiotemporal pattern of air quality index and its associated factors in 31 Chinese provincial capital cities / L. Xu, J. Zhou, Y. Guo, T. Wu, T. Chen, Q. Zhong, D. Yuan, P. Chen, C. Ou // *Air Quality, Atmosphere & Health*. – 2017. – Vol. 10. – P. 601–609. DOI: 10.1007/s11869-016-0454-8.
54. Spatial and temporal analysis of air pollution index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001–2011 / L. Li, J. Qian, C.-Q. Ou, Y.-X. Zhou, C. Guo, Y. Guo // *Environmental Pollution*. – 2014. – Vol. 190. – P. 75–81. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.03.020.
55. Aeolian dust transport, cycle and influences in high-elevation cryosphere of the Tibetan Plateau region: new evidences from alpine snow and ice / Z. Dong, J. Brahney, S. Kang, J. Elser, T. Wei, X. Jiao, Y. Shao // *Earth-Science Reviews*. – 2020. – Vol. 211. – P. 103408. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103408.
56. Improved 1 km resolution PM_{2.5} estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees / J. Wei, M. Li, W. Cribb, W. Huang, L. Xue, J. Sun, Y. Guo, J. Peng, A. Li, L. Lyapustin, H. Liu, Y. Wu // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 20. – № 6. – P. 3273–3289. DOI: 10.5194/acp-20-3273-2020.
57. Su T., Li Z., Kahn R. Relationships between the planetary boundary layer height and surface pollutants derived from lidar observations over China: regional pattern and influencing factors // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2018. – Vol. 18. – № 21. – P. 15921–15935. DOI: 10.5194/acp-18-15921-2018.
58. Глазунов В.Г. Анализ перспектив моделирования мезоклиматических различий мегаполиса и окружающей местности // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*. – 2000. – № 6. – С. 19–24.
59. Проект нормативов предельно допустимых выбросов атмосферы для Кемеровской ГРЭС АО «Кемеровская генерация». – Кемерово: Кемеровская ГРЭС, 2016. – 268 с.
60. Зубицкий Б.Д. Обоснование и разработка технологических процессов модернизации коксохимического производства в сложных экологических условиях (на примере ОАО «Кокс»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2000. – 22 с.
61. Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Соромотин А.В. Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 156–169. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3195.
62. Чудинова О.Н., Норбоева С.Б. Оценка загрязнения снегового покрова в зоне воздействия объектов теплоэнергетики // *Известия БГУ*. – 2023. – № 1. – С. 121–129. DOI: 10.17150/2500-2759.2023.33(1).121-129.
63. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83.
64. Формы нахождения урана в углях и торфах Северной Азии / С.И. Арбузов, С.С. Ильенок, А.В. Волостнов, С.Г. Маслов, В.С. Архипов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 109–115.
65. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 648 с.
66. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий (на примере г. Новосибирск) / С.Б. Бортникова, В.Ф. Рапута, А.Ю. Девятова, Ф.Н. Юдахин // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2009. – № 6. – С. 515–525.

67. Онищук Н.А. Особенности современного режима снежного покрова и химический состав атмосферных осадков в южной части Иркутской области: автореф. дис. ... канд. географ. наук. – Казань, 2010. – 23 с.
68. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.

Информация об авторах

Валерия Дмитриевна Новикова, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; vdk10@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>

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

Поступила в редакцию: 31.01.2025

Поступила после рецензирования: 17.02.2025

Принята к публикации: 03.03.2025

REFERENCES

1. Safonov S.A. The coal industry. Environmental pollution while improving the quality characteristics of coal. *Bulletin of Science and Education*, 2024, no. 3, pp. 16–19. (In Russ.)
2. Garcia E., Liu P., Bone S.E., Wen Y., Tang Y. Systematic characterization of selenium speciation in coal fly ash. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2024, vol. 26 (12), pp. 2240–2249. DOI: 10.1039/d4em00398e.
3. Ige O., Ratnayake I., Martinez J., Pepper S., Alsup A., McGuirk M., Gajewski B., Mudaranthakam D.P. A regional study to evaluate the impact of coal-fired power plants on lung cancer incident rates. *Journal of Cancer Epidemiology and Prevention*, 2024, vol. 2 (1), pp. 2240–2249. DOI: 10.1080/28322134.2024.2348469.
4. Vig N., Khaiwal R., Mor S. Environmental impacts of Indian coal thermal power plants and associated human health risk to the nearby residential communities: a potential review. *Chemosphere*, vol. 341, 140103. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140103.
5. Revich B.A. To assess the impact of fuel and energy complex activities on the quality of the environment and public health. *Forecasting problems*, 2010, no. 4, pp. 87–99. (In Russ.)
6. Yanin E.P. *Mercury in dust emissions from industrial enterprises*. Moscow, IMGRE Publ., 2004. 24 p. (In Russ.)
7. Voloh A.A. Experience in controlling atmospheric air pollution by metals and volatile organic compounds in urban and background areas. *Geochemical studies of urban agglomerations*. Moscow, IMGRE Publ., 1998. pp. 40–58. (In Russ.)
8. Liu Q., Gao J., Li G., Zheng Y., Li R., Yue T. Bibliometric analysis on mercury emissions from coal-fired power plants: a systematic review and future prospect. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, vol. 31 (13), pp. 19148–19165. DOI: 10.1007/s11356-024-32369-z.
9. Huang Y., Hu H., Fu B., Zou C., Liu H., Liu X., Wang L., Luo G., Yao H. Fine particulate-bound arsenic and selenium from coal-fired power plants: formation, removal and bioaccessibility. *Science of the Total Environment*, 2022, 823:153723. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153723.
10. Liu X., Tan X., Li X., Cheng Y., Wang K. Spatial distribution, environmental behavior, and health risk assessment of PAHs in soils at prototype coking plants in Shanxi, China: stable carbon isotope and molecular composition analyses. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 468:133802. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133802.
11. Wu Y., Xu Z., Liu S., Tang M., Lu S. Emission characteristics of PM_{2.5} and components of condensable particulate matter from coal-fired industrial plants. *Science of the Total Environment*, 2021, 796:148782. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148782
12. Boyarkina A.P., Baykovskiy V.V., Vasilev N.V. *Aerosols in natural plates of Siberia*. Tomsk, TSU Publ., 1993. 157 p. (In Russ.)
13. Yazikov E.G. *Ecogeochemistry of urbanized territories in the South of Western Siberia*. Dr. Diss. Tomsk, 2006. 423 p. (In Russ.)
14. Astray B., Šípková 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.
15. Moskovchenko D., Pozhitkov R., Soromotin A., Tyurin V. The content and sources of potentially toxic elements in the road dust of Surgut (Russia). *Atmosphere*, 2022, vol. 13 (30), pp. 1–19. DOI: 10.3390/atmos13010030.
16. Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Y., Soromotin A.V. Snow Contamination by Metals and Metalloids in a Polar Town: A Case Study of Nadym, Russia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2024, vol. 86, pp. 304–324. DOI: 10.1007/s00244-024-01057-x.
17. Vlasov D., Vasil'chuk J., Kosheleva N., Kasimov N. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: partitioning and deposition rates in western Moscow. *Atmosphere*, 2020, vol. 11 (9), 907. DOI: 10.3390/atmos11090907.
18. Starodymova D.P., Kotova E.I., Shevchenko V.P., Titova K.V., Lukyanova O.N. Winter atmospheric deposition of trace elements in the Arkhangelsk region (NW Russia): insights into environmental effects. *Atmospheric Pollution Research*, 2024, vol. 15 (12), 102310. DOI: 10.1016/j.apr.2024.102310.

19. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G., Kukushkin S.Yu., Janson S.Yu. Mineralogical and geochemical parameters of snow cover within the anthropogenically disturbed sites of the Nadym-pur interfluve (Northern part of Western Siberia). *Bulletin of the Moscow University*, 2024, vol. 79, pp. 17–31. (In Russ.) DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.2.
20. Raputa V.F., Talovskaya A.V., Kokovkin V.V., Yazikov E.G. Analysis of observational data on aerosol pollution of snow cover in the vicinity of Tomsk and Seversk. *Optics of the Atmosphere and Ocean*, 2011, vol. 24, no. 1, pp. 74–78. (In Russ.)
21. Kasimov N.S. *Ecogeochemistry of urban landscapes*. Moscow, MSU Publ., 1995. 336 p. (In Russ.)
22. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dynamics of the elemental composition of snow cover in the northeastern zone of influence of the Tomsk-Seversk industrial agglomeration. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2014, vol. 27, no. 6, pp. 491–495. (In Russ.)
23. Yazikov E.G., Talovskaya A.V., Zhornyak L.V. *Mineralogy of technogenic formations: a textbook for academic bachelor's degree*. Moscow, Yurajt Publ., 2016. 160 p. (In Russ.)
24. Bortnikova S.B., Raputa V.F., Devyatova A.Yu., Yudahin F.N. Methods of analyzing snow cover pollution data in the zones of influence of industrial enterprises (on the example of Novosibirsk). *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, Geocryology*, 2009, no. 6, pp. 515–525. (In Russ.)
25. Artamonova S.Yu. Uranium and thorium in aerosol precipitation of 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.)
26. Lezhenin A.A., Yaroslavceva T.V., Raputa V.F. Monitoring of aerosol pollution of snow cover based on ground and satellite information. *Journal of the Siberian Federal University. Machinery and technology*, 2016, no. 9 (7), pp. 950–959. (In Russ.)
27. *Decree of the Government of the Russian Federation dated 06.10.2021, no. 2816-R*. Moscow, Collection of legislation of the Russian Federation Publ., 2021. 6 p. (In Russ.)
28. Dudkina O.A., Minina V.I. Anthropogenic urban pollution and its impact on the population of the Kemerovo region. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, no. 5, pp. 255–258. (In Russ.)
29. Larin S.A., Mun S.A., Brailovskij V.V., Magarill Yu.A., Popov A.N., Eryomina N.A. Incidence of lung cancer and stomach cancer in the Kemerovo region from 1996 to 2015. *Fundamental and Clinical Medicine*, 2017, no. 2 (2), pp. 43–51. (In Russ.)
30. *Geological and ecological map of the city of Novokuznetsk and the suburban area: a report on geological and ecological studies of the city of Novokuznetsk and the suburban area conducted in 1993-96*. Ed. by V.L. Nekipely, N.I. Nemtina, S.A. Nekipelaya. Novokuzneck, Kuzbassekogeocenter LLP Publ. house, 1998. Vol. 2, 1998 p. (In Russ.)
31. Zhuravleva N.V., Potokina R.R., Ismagilov Z.R., Habibulina E.R. Pollution of snow cover by polycyclic aromatic hydrocarbons and toxic elements on the example of Novokuznetsk. *Chemistry in the interests of sustainable development*, 2014, vol. 22, no. 5, pp. 445–454. (In Russ.)
32. *Report on the state and environmental protection of the Kemerovo region in 2020 and 2023*, Kemerovo, 2023. (In Russ.) Available at: <http://kuzbasseco.ru/doklady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/> (accessed 20 May 2024).
33. Zubickij B.D., Lyapip V.B., Gaus A.I., Nazarov V.G. Protection of the atmosphere during the modernization of the coke plant. *Coke and Chemistry*, 1997, no. 4, pp. 37–39. (In Russ.)
34. Mihajluc A.P., Zajcev V.N., Ivanov S.V., Zubickij B.D. *Ecological and hygienic problems of cities with a developed chemical industry*. Novosibirsk, CERIS Publ., 1997. 191 p. (In Russ.)
35. Zhuravlev N.M., Klem-Musatova I.K., Churashev V.N. Assessment of the environmental impact of enterprises in Siberia and the Far East. *Region: Economics and Sociology*, 2002, no. 4, pp. 88–102. (In Russ.)
36. Kasimov N.S., Kosheleva N.V., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover in the Eastern District of Moscow. *Bulletin of the Moscow University. Ser. 5: Geography*, 2012, no. 4, pp. 14–24. (In Russ.)
37. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Environmental geochemistry*. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p. (In Russ.)
38. Mihajluc A.P., Saet Yu.I., Smirnova R.S., Sorokina E.P. *Methodological recommendations for the geochemical assessment of urban pollution by chemical elements*. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 111 p. (In Russ.)
39. *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.)
40. 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.)
41. 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. Dis s. Tomsk, 2022. 373 p. (In Russ.)
42. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, vol. 59, no. 7, pp. 1217–1232. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00038-2.
43. Rudnick R.L. Composition of the continental crust. *Treatise on geochemistry*, 2003, vol. 3, 659 p. DOI: 10.1016/b0-08-043751-6/03016-4.
44. Hu Z. Upper crustal abundances of trace elements: a revision and update. *Chemical Geology*, 2008, vol. 253 (3–4), pp. 205–221. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.010.
45. Grigorev N. A. *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Yekaterinburg, Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 383 p. (In Russ.)
46. Glazovskiy N.F. Technogenic flows of matter in the biosphere. *Mining and geochemistry of natural ecosystems*. Moscow, Nauka Publ., 1982. pp. 7–28 (In Russ.)
47. Glazovskaya M.A. *Geochemistry of natural and man-made landscapes of the USSR*. Moscow, Higher School of Economics Publ., 1988. 328 p. (In Russ.)
48. *Archive of weather in Russia. Archive of weather in Kemerovo*. (In Russ.) Available at: <https://world-weather.ru/archive/russia/kemerovo/> (accessed 20 May 2024).

49. *Kemerovo city heat supply scheme until 2033 (updated for 2020). Supporting materials. Chapter 10 Prospective fuel balances.* (In Russ.) Available at: <https://kemerovo.ru/sfery-deyatelnosti/gorodskoe-zhkhk/skhema-teplosnabzheniya-goroda-kemerovo-do-2033-goda> (accessed 20 May 2024).
50. Adler Yu.A., Markova E.V., Granovskij Yu.V. *Planning an experiment in the search for optimal conditions.* Moscow, Nauka Publ., 1976. 140 p. (In Russ.)
51. Xu W., Han T., Du W., Wang Q., Chen C., Zhao J., Zhang Y., Li J., Fu P., Wang Z. Effects of aqueous-phase and photochemical processing on secondary organic aerosol formation and evolution in Beijing, China. *Environ. Sci. Technol.*, 2017, vol. 51 (2), pp. 762–770. DOI: 10.1021/acs.est.6b04498.
52. Kuang Y., He Y., Xu W., Yuan B., Zhang G., Ma Z., Wu C., Wang C., Wang S., Zhang S., Tao J., Ma N., Su H., Cheng Y., Shao M. Photochemical aqueous-phase reactions induce rapid daytime formation of oxygenated organic aerosol on the North China Plain. *Environmental Science & Technology*, 2020, vol. 54, no. 7, pp. 3849–3860. DOI: 10.1021/acs.est.9b06836.
53. Xu L., Zhou J., Guo Y., Wu T., Chen T., Zhong Q., Yuan D., Chen P., Ou C. Spatiotemporal pattern of air quality index and its associated factors in 31 Chinese provincial capital cities. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, vol. 10, pp. 601–609. DOI: 10.1007/s11869-016-0454-8.
54. Li L., Qian J., Ou C.-Q., Zhou Y.-X., Guo C., Guo Y. Spatial and temporal analysis of air pollution index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001–2011. *Environmental Pollution*, 2014, vol. 190, pp. 75–81. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.03.020.
55. Dong Z., Brahney J., Kang S., Elser J., Wei T., Jiao X., Shao Y. Aeolian dust transport, cycle and influences in high-elevation cryosphere of the Tibetan Plateau region: new evidences from alpine snow and ice. *Earth-Science Reviews*, 2020, vol. 211. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103408.
56. Wei J., Li M., Cribb W., Huang W., Xue L., Sun J., Guo Y., Peng J., Li A., Lyapustin L., Liu H., Wu Y., Song. Improved 1 km resolution PM_{2.5} estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees. *Atmos. Chem. Phys.*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 3273–3289. DOI: 10.5194/acp-20-3273-2020.
57. Su T., Li Z., Kahn R. Relationships between the planetary boundary layer height and surface pollutants derived from lidar observations over China: regional pattern and influencing factors. *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, vol. 18, no. 21. DOI: 10.5194/acp-18-15921-2018.
58. Glazunov V.G. Analysis of prospects for modeling mesoclimatic differences between a megalopolis and the surrounding area. *MGUL Bulletin is a Forest bulletin*, 2000, no. 6, pp. 19–24. (In Russ.)
59. *Draft standards of maximum permissible atmospheric emissions for Kemerovo GRES of Kemerovo Generation JSC.* Kemerovo, Kemerovo GRES Publ., 2016. 268 p. (In Russ.)
60. Zubickij B.D. *Substantiation and development of technological processes for modernization of coke chemical production in difficult environmental conditions (on the example of JSC Koks).* Cand. Diss. Krasnoyarsk, 2000. 22 p. (In Russ.)
61. Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Soromotin A.V. Geochemical characteristics of snow cover in Tobolsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 156–169. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3195 (In Russ.)
62. Chudinova O.N., Norboeva S.B. Assessment of snow cover pollution in the impact zone of thermal power facilities. *Bulletin of the BSU*, 2023, no. 1, pp. 121–129. (In Russ.) DOI: 10.17150/2500-2759.2023.33(1).121-129.
63. Arbuzov S.I. Metallicity of Siberian coals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. (In Russ.)
64. Arbuzov S.I., Ilenok S.S., Volostnov A.V., Maslov S.G., Arhipov V.S. The forms of uranium in the coals and peat of North Asia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 109–115. (In Russ.)
65. Yudovich Ya.E. *Toxic elements-impurities in fossil coals.* Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2005. 648 p. (In Russ.)
66. Bortnikova S.B., Raputa V.F., Devyatova A.Yu., Yudahin F.N. Methods of analyzing snow pollution data in areas of influence of industrial enterprises (on the example of Novosibirsk). *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2009, no. 6, pp. 515–525. (In Russ.)
67. Onishchuk N.A. *Features of the modern snow cover regime and the chemical composition of atmospheric precipitation in the southern part of the Irkutsk region.* Cand. Diss. Kazan, 2010. 23 p. (In Russ.)
68. Yanin E.P. *Mercury in the environment of an industrial city.* Moscow, IMGRE Publ., 1992. 169 p. (In Russ.)

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: 31.01.2025

Revised: 17.02.2025

Accepted: 03.03.2025