

Читать
онлайнRead
online

Журба О.М., Рукавишников В.С., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В., Алексеенко А.Н.

Оценка антропогенного загрязнения снежного покрова в зоне размещения нового производства алюминия

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения аэротехногенной нагрузки на новые территории, прилегающие к предприятиям алюминиевой отрасли.

Цель исследования — оценить содержание тяжёлых металлов, полициклических ароматических углеводородов и нефтяных углеводородов в снеговом покрове на примере различных районов Тайшета.

Материалы и методы. Снегогеохимическая съёмка, метод атомно-абсорбционной спектроскопии, метод газовой хромато-масс-спектрометрии, эколого-геохимические и статистические методы.

Результаты. В снеговых пробах выявлены определяющие геохимическую специфику выбросов тяжёлые металлы (ТМ) следующих классов: I — Pb, Hg, Cd; II — Cu, Cr, Fe, Ni; III — Zn, Mn. Значения медианы ТМ определены в интервале 0,03–111; 0,11–102,5 и 0,14–137 мкг/л для селитебной, рекреационной и промышленной зон соответственно. ΣПАУ составили от 177 нг/л (точка 5 — рекреационная зона) до 3526 нг/л (точка 9 — промышленная зона) с преобладанием 4-, 5- и 6-ядерных ПАУ (67%). Доля канцерогенных ПАУ возрастает от селитебной (26,1%) к условно промышленной (48,9%) зоне. Уровни нефтяных углеводородов (НУ) определены в диапазоне концентраций 21–60 мкг/л.

Ограничения исследования. Одним из потенциальных ограничений этого исследования является отсутствие данных о содержании вредных веществ в источниках поступления в окружающую среду.

Заключение. Уровни загрязнения ПАУ, НУ и ТМ на территории были средними и низкими. Определены характерные черты состава ПАУ под влиянием техногенных эмиссий. Наибольшие показатели суммы коэффициентов накопления ПАУ отмечены в районах с многоэтажной застройкой (точка 11 — 67,98) и в районе алюминиевого производства у КПП № 7 (точка 9 — 44,51); показатели суммарного загрязнения ТМ Zc (46,29 и 65,02) — у КПП № 7 (точка 9) и очистных сооружений (точка 5) соответственно. Полученные результаты исследования могут быть использованы для прогнозирования техногенного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: снежный покров; загрязнения; полициклические ароматические углеводороды (ПАУ); бенз(а)пирен; тяжёлые металлы; нефтепродукты

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Журба О.М., Рукавишников В.С., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В., Алексеенко А.Н. Оценка антропогенного загрязнения снежного покрова в зоне размещения нового производства алюминия. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(10): 1269–1276. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1269-1276> <https://elibrary.ru/brddbe>

Для корреспонденции: Журба Ольга Михайловна, e-mail: zhurba99@gmail.com

Участие авторов: Журба О.М. — концепция и дизайн исследования, поиск источников литературы, обработка данных, экспедиционные работы, написание текста; Рукавишников В.С. — научное консультирование, актуальность, обсуждение; Шаяхметов С.Ф. — концепция и дизайн исследования, организация исследования, редактирование, обсуждение; Меринов А.В. — сбор данных литературы, лабораторные работы, статистическая обработка, полевые работы, написание текста; Алексеенко А.Н. — сбор и обработка материала, полевые работы, лабораторные исследования. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Работа выполнена в рамках средств, выделяемых для выполнения государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ.

Поступила: 16.07.2025 / Поступила после доработки: 05.09.2025 / Принята к печати: 15.10.2025 / Опубликовано: 14.11.2025

Olga M. Zhurba, Victor S. Rukavishnikov, Salim F. Shayakhmetov, Alexey V. Merinov,
Anton N. Alekseenko

Assessment of anthropogenic pollution of snow cover in the area of the location of the new aluminum production facility

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is due to the need to study the aero-technogenic load on new territories adjacent to the production zones of the aluminum industry.

Research objective. To assess the content of heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons, and petroleum hydrocarbons in snow cover using the example of various districts of the city of Tayshet.

Materials and methods. Snow geochemical survey, atomic absorption spectrometry; gas chromatography-mass spectrometry, ecological-geochemical and statistical methods.

Results. The chemical elements determining the geochemical specificity of emissions identified in the snow samples were divided into the following classes: I — Pb, Hg, Cd; II — Cu, Cr, Fe, Ni; III — Zn, Mn. The median values of heavy metals (HM) were determined in the range of 0.03–111.0; 0.11–102.5 and 0.14–137.0 µg/L for the residential, recreational, and industrial zones, respectively. ΣPAHs ranged from 177 ng/L (T. 5 — recreational zone) to 3526.0 ng/L (T. 9 industrial zone), with a predominance of 4–6-nuclear PAHs (67.0%). The proportion of carcinogenic PAHs in the study increases from the residential (26.1%) to the conditionally industrial (48.9%) zone. The levels of petroleum hydrocarbons (PH) were determined in the concentration range of 21.0–60.0 µg/L.

Limitations. One potential limitation of this study is the lack of data on the concentrations of contaminants at environmental sources.

Conclusion. The levels of PAH, PH, and HM pollution in the area were low to medium. The characteristic features of the PAH composition under the influence of technogenic emissions were determined. The highest values of the sum of the PAH accumulation factors were noted in areas with multi-story buildings

(T. 11 – 67.98) and in the area of aluminum production near checkpoint #7 (T. 9 – 44.51); the indicator of the total HM pollution Zc (46.29 and 65.02) near checkpoint #7 (T. 9) and treatment facilities (T. 5), respectively. The obtained results of the study can be used to predict the technogenic impact on the environment.

Keywords: snow cover; pollution; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH); benz(a)pyrene; heavy metals; petroleum products

Compliance with ethical standards. The study does not require submission of the Biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Zhurba O.M., Rukavishnikov V.S., Shayakhmetov S.F., Merinov A.V., Alekseenko A.N. Assessment of anthropogenic pollution of snow cover in the area of the location of the new aluminum production facility. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(10): 1269–1276. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1269-1276> <https://elibrary.ru/brddbe> (In Russ.)

For correspondence: Olga M. Zhurba, e-mail: zhurba99@gmail.com

Contribution: Zhurba O.M. – concept and design of the study, search for literature sources, data processing, field work, writing the text; Rukavishnikov V.S. – scientific consulting, relevance, discussion; Shayakhmetov S.F. – concept and design of the study, organization of the study, editing, discussion; Merinov A.V. – collection of literature data, laboratory work, statistical processing, field work, writing; Alekseenko A.N. – collection and processing of material, field work, laboratory research. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

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

Funding. The work was performed within the framework of funds allocated for the implementation of the state task East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research.

Received: July 16, 2025 / Revised: September 5, 2025 / Accepted: October 15, 2025 / Published: November 14, 2025

Введение

На территории Сибири одной из ведущих отраслей промышленности является производство алюминия [1]. В воздушную среду в промышленных центрах выбрасывается значительное количество загрязняющих веществ, таких как газообразные и твёрдые фториды, фтористый водород, оксид углерода, металлическая и фторсодержащая пыль, а также смолистые вещества, в состав которых входят полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [2]. Многие загрязняющие агенты обладают высокотоксичным и канцерогенным эффектом, оказывают неблагоприятное воздействие на среду обитания и создают угрозу для здоровья населения [3–7]. Влиянию алюминиевого производства на окружающую среду посвящено много исследований, описывающих с помощью такого универсального природного планшета, как снеговой покров, воздействие промышленных гигантов на состояние приземного слоя атмосферы [8–10].

Результаты исследований снеговой талой воды в качестве индикатора загрязнения воздействия Иркутского алюминиевого завода (ИрА3) ОК РУСАЛ представлены в работах Н.И. Просекина и соавт. [11], исследовавших пылевое загрязнение атмосферы на территории пригородных районов Шелехова и Иркутска по данным снегогеохимической съёмки. Установлено, что выбросы алюминиевого производства содержат Al, F, As, Be, Na, Cd, Pb, Ni. В исследовании [9] описан химический состав снегового покрова в различных функциональных зонах Шелехова, изучено распределение частиц по фракционному составу в различных типах газопылевых выбросов. В работах [10, 12, 13] проведена оценка экологической ситуации Красноярска в зоне влияния «АО РУСАЛ Красноярск». Игнатенко О.В. анализировала распределение фтористых соединений в зоне выбросов алюминиевого производства «РУСАЛ Братск» [14]. В то же время исследования среды обитания в зоне размещения новых производств алюминия отсутствуют. Сегодня особое внимание уделяется реконструкции, технической модернизации алюминиевой отрасли на основе внедрения новых технологий, позволяющих предельно снизить канцерогенные риски и влияние производства на среду обитания [1]. На территории Тайшета расположен алюминиевый кластер, не уступающий мировым лидерам металлургии [15].

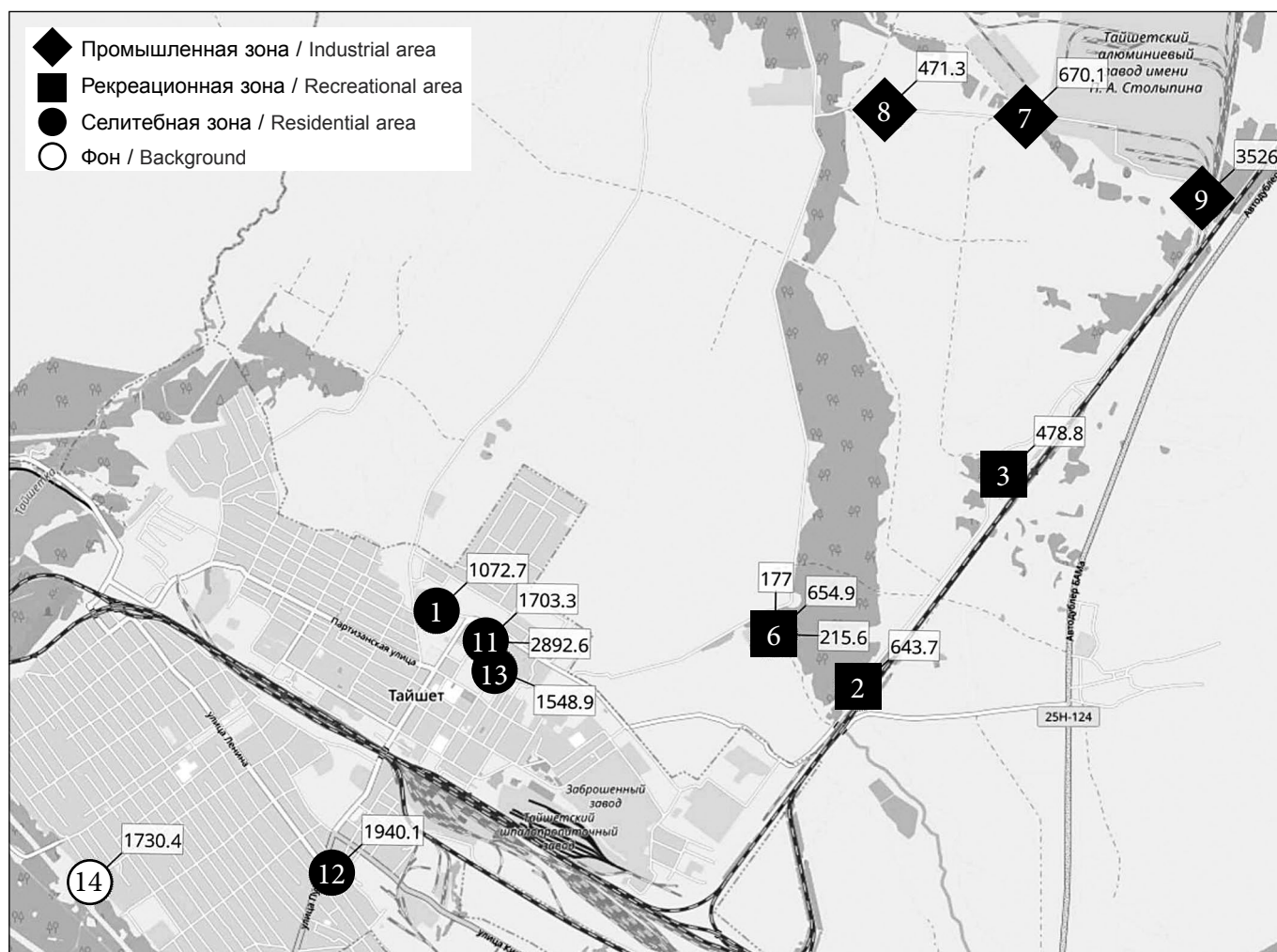
В атмосферных взвешах природно-техногенных комплексов городов содержится достаточно большое количество техногенной пыли. Снеговой покров как информационный носитель атмосферных выпадений характеризует уровень загрязнения атмосферного воздуха и позволяет оценить степень техногенного внедрения антропогенных изменений [16, 17]. Химический состав атмосферных выпадений остаётся ключевым при определении последствий распространения загрязняющих атмосферу веществ [18–21]. Чувствительность снегового покрова к смене индустриальной

обстановки в урбосистеме позволяет объективно оценивать состояние среды обитания. Следовательно, накопление поллютантов в снежном покрове является одним из ключевых факторов, влияющих на пространственно-временное распределение и характеристики отложений в высокоширотных регионах с устойчивым снежным покровом, что требует дальнейшего изучения.

Цель исследования – оценить содержание тяжёлых металлов, полициклических ароматических углеводородов и нефтяных углеводородов в снеговом покрове на примере различных районов Тайшета.

Материалы и методы

Изучение содержания в снежных выпадениях тяжёлых металлов (ТМ), полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), нефтяных углеводородов (НУ) проведено на территории Тайшета – малого города с разнотраслевой промышленностью (Тайшетский алюминиевый завод (ТаА3), анодная фабрика, предприятия теплоэнергетики (котельные) и др.) и крупного транспортно-логистического узла. ТаА3 оборудован современными системами сухой очистки газов, эффективность улавливания составляет более 98,5%. В период отбора проб снега завод ещё не вышел на заданные мощности. Отбор проб проводили в период максимального снегонакопления (конец февраля – начало марта) в нескольких условных функциональных зонах с разными уровнями загрязнения с различной степенью влияния факторов загрязнения: I – промышленная зона (точка 7 – у Алюминиевого завода (КПП № 6), 55.985979 с. ш., 98.107413 в. д.; точка 8 – у Алюминиевого завода (1 км на северо-восток), 55.98651 с. ш., 98.08720 в. д.; точка 9 – у Алюминиевого завода (КПП № 7), 55.979269 с. ш., 98.132927 в. д.; II – рекреационная зона (точка 2 – территория Грибанова гора, 55.939067 с. ш., 98.083221 в. д.; точка 3 – железнодорожная станция Акульшет, 55.956621 с. ш., 98.104144 в. д.; точка 5 – очистные сооружения, 55.943518 с. ш., 98.071277 в. д.; точка 6 – территория перед очистными сооружениями, 55.943518 с. ш., 98.071277 в. д.); III – селитебная зона (точка 1 – м/р Центральный, 55.945388 с. ш., 98.022498 в. д.; точка 4 – ул. Целинная, 55.943518 с. ш., 98.071277 в. д.; точка 10 – д/с «Сказка», 55.942907 с. ш., 98.029666 в. д.; точка 11 – детский сад «Белочка», 55.942907 с. ш., 98.029666 в. д.; точка 12 – МКОУ СОШ № 2, 55.923924 с. ш., 98.007409 в. д.; точка 13 – МКОУ СОШ № 5, 55.940707 с. ш., 98.030961 в. д.); IV – точка 14 – контрольная отметка (лесная зона), 55.923206 с. ш., 97.972835 в. д. (см. рисунок). Устойчивый снежный покров на территории исследования появляется в конце октября – начале ноября и держится до середины апреля. В каждой точке отбирали пять кернов методом конверта. Необходимый отбираемый объём пробы зависел от высоты снежного покрова, особое внимание обращали на отбор пробы у по-



Карта-схема и точки отбора образцов снежного покрова территории Тайшета по функциональным зонам; содержание Σ ПАУ в образцах снега (нг/л).
Map-diagram and sampling points of snow cover samples of the territory of the city of Taisheet by functional zones; content of Σ PAH in snow samples (ng/L).

верхности для исключения влияния почвы. Далее пробы помещали в полиэтиленовые ёмкости и доставляли в замороженном виде для последующих исследований.

Пробоподготовка и анализ веществ проведены на базе лаборатории аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ. Подготовку проб и анализ основных форм металлов (Fe, Cd, Mn, Cu, Zn, Cr, Pb и Ni) проводили с помощью атомно-абсорбционного спектрометра AA DUO Agilent 240FS/240Z/UltrAAsystem (Agilent Technologies, США) в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.4.139–98¹. Ртуть в снеговых пробах определяли методом холодного пара, согласно ПНД Ф 14.1:2.4.20–95². Содержание НУ анализировали в жидкой фазе после экстракции гексаном в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.4.128–98 с применением «Флюорат-02»³ (Люмекс, Россия).

¹ ПНД Ф 14.1:2.4.139–98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектрометрии. М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды; 1998 (издание 2010 г.).

² ПНД Ф 14.1:2.4.20–95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций ионов ртути в питьевых, поверхностных и сточных водах методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. М.: ФБУ ФЦАО; 2011.

³ ПНД Ф 14.1:2.4.128–98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природной, питьевой и сточной воды флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». М.: Издательство стандартов; 1998.

Определение ПАУ в талой воде заключалось в её разделении на твёрдый осадок, состоящий из атмосферной пыли, осаждаемой на поверхность снегового покрова, и жидкую фракцию (фильтрат) снеговой воды, полученной при оттаивании с последующим анализом на ГХ-МС системе Agilent 5975C каждой из фракций. Талую воду объёмом 0,5 дм³ разделяли на твёрдую и жидкую фракции, пропуская через фильтр «красная лента» на воронке Бюхнера под вакуумом, а затем через мембранный фильтр на фильтрационной системе [22].

Возможности современной аналитической химии не позволяют на практике определять сотни замещённых и незамещённых ПАУ, присутствующих в пробах объектов природной среды [23]. В разных директивах предлагается проводить мониторинг от одного ПАУ (бенз(а)пирена [Б(а)П] – общепринятого индикаторного представителя для всего профиля ПАУ, являющегося одним из основных загрязняющих веществ в городской атмосфере), или 16 приоритетных ПАУ [22, 24].

Оценку загрязнения (ТМ, ПАУ и НУ) снежного покрова в различных функциональных зонах города проводили с использованием эколого-геохимических и гигиенических показателей. Определяли коэффициент концентрации $K_c = C_i/C_f$, где C_i и C_f – фактическая и фоновая концентрация элемента в пробе (мкг/л); суммарный показатель загрязнения (для металлов в снеге) $Z_c = \sum K_{ci} - (n - 1)$, где n – число учитываемых элементов; степень химического загрязнения определялась в зависимости от величин Z_c

Таблица 1 / Table 1

Содержание полициклических ароматических углеводородов (нг/л) и нефтяных углеводородов (мкг/л) в снежном покрове Тайшета
Content of PAHs (ng/L) and petroleum products (µg/L) in the snow cover of the Taishet city

Показатель Index	Зоны / Zones <i>Me (Q₂₅–Q₇₅), min-max</i>			Фоновый уровень Background level
	Селитебная Residential <i>n</i> = 6	Рекреационная Recreational <i>n</i> = 4	Промышленная Industrial <i>n</i> = 3	
Нафталин Naphthalene	63.2 (44.5–87.4) 39.7–94.1	36.9 (32.9–39.4) 21.4–46.2	10.8 (10.6–29.6) 10.3–48.4	49.0
2-метилнафталин 2-methylnaphthalene	37.7 (35.0–48.6) 23.1–56.0	23.0 (18.0–27.1) 8.6–33.7	17.3 (11.9–31.8) 6.4–46.3	19.5
Бифенил Biphenyl	21.0 (20.2–24.5) 16.6–25.6	10.3 (7.4–13.0) 5.4–14.5	13.0 (10.7–17.3) 8.4–21.6	15.5
Аценафтилен Acenaphthylene	41.9 (26.9–47.7) 18.2–57.8	10.2 (9.2–11.0) 8.9–11.0	5.2 (3.1–11.5) 0.90–17.8	31.8
Аценафтен Acenaphthene	15.8 (9.8–25.7) 5.9–55.9	2.5 (0.48–4.5) 0.40–4.7	4.2 (2.4–6.8) 0.50–9.4	7.3
Флуорен Fluorene	33.7 (31.5–68.8) 16.5–154.3	10.3 (8.8–11.5) 7.1–12.4	7.8 (7.2–12.0) 6.6–16.1	51.4
Фенантрен Phenanthrene	407.6 (344.8–554.4) 158.5–799.6	55.2 (36.6–81.2) 36.2–103.9	136.8 (117.0–337.2) 97.2–537.6	519.3
Антрацен Anthracene	49.1 (34.8–62.1) 29.5–78.6	10.0 (6.8–12.4) 2.1–14.9	50.9 (36.6–53.7) 22.2–56.5	54.7
Флуорантен Fluoranthene	204.4 (170.4–259.1) 104.5–591.2	50.1 (29.9–83.4) 27.6–124.8	40.8 (40.3–259.5) 39.7–478.1	300.7
Пирен Ругене Pyrene	149.8 (118.7–207.5) 81.3–414.2	38.6 (22.9–64.1) 22.8–93.7	38.1 (36.5–197.6) 34.8–357.1	224.8
Бенз(а)антрацен Benz(a)anthracene	29.9 (19.4–67.1) 16.7–109.9	9.6 (3.4–15.6) 2.6–15.7	33.7 (30.0–129.2) 26.2–224.7	60.3
Хризен Chrysen	48.5 (35.4–96.2) 30.4–152.0	18.9 (6.3–31.4) 6.1–31.8	81.1 (61.5–243.6) 41.9–406.0	76.3
Бенз(б)флуорантен Benz(b)fluoranthene	48.1 (33.6–114.5) 26.8–143.6	20.2 (7.1–37.3) 6.7–49.4	88.2 (65.0–208.6) 41.8–329.0	77.6
Бенз(к)флуорантен Benz(k)fluoranthene	35.8 (24.4–76.6) 21.0–139.1	13.9 (6.1–29.5) 5.0–54.4	51.5 (39.3–130.0) 27.0–208.4	70.4
Бенз(а)пирен Benzo(a)pyrene	29.1 (18.2–63.5) 13.0–131.4	10.9 (4.6–18.0) 3.7–21.7	40.0 (32.9–227.5) 25.8–415.0	54.8
Дибенз(а, h)антрацен Dibenz(a, h)anthracene	1.5 (1.1–14.2) 0.6–312.6	0.3 (0.0–1.0) 0.0–2.2	7.1 (5.5–21.1) 3.9–35.0	6.2
Бенз(г, h, i)перилен Benz(g, h, i)perylene	67.4 (41.2–133.6) 27.1–207.3	17.7 (8.1–28.2) 6.9–32.5	71.6 (60.7–195.3) 49.7–319.0	110.8
ΣПАУ ΣPAHs	1626.1 (1191.8–1880.9) 654.9–2892.6	347.2 (206.0–520.0) 177.0–643.7	670.1 (570.7–2098.1) 471.3–3526.0	1730.4
Доля Б(а)П, % Proportion of B(a)P, %	2.3 (1.6–2.5) 1.2–6.8	3.1 (2.5–3.4) 1.7–3.5	6.0 (5.8–8.9) 5.5–11.8	3.2
Доля 2-, 3-ядерных ПАУ, % Proportion of 2-, 3- nuclear PAHs, %	47.2 (42.4–57.4) 30.2–62.1	47.2 (41.0–53.4) 34.2–60.1	33.0 (27.2–35.3) 21.4–37.6	43.3
Доля 4-, 5-, 6-ядерных ПАУ, % Proportion of 4-, 6- nuclear PAHs, %	52.8 (42.7–57.6) 37.9–69.8	52.8 (46.7–59.0) 39.9–65.8	67.0 (64.7–72.8) 62.4–78.6	56.7
Доля канцерогенных ПАУ, % Proportion of carcinogenic PAHs, %	26.1 (22.5–36.6) 18.7–39.5	33.5 (31.5–35.5) 29.8–37.3	48.9 (45.6–51.6) 42.2–54.2	26.0
Нефтяные углеводороды, мкг/л Petroleum hydrocarbons, µg/L	50.0 (41.8–51.5) 35.0–60.0	23.0 (21.0–26.5) 21.0–31.0	32.0 (29.5–37.5) 27.0–43.0	36.0

Таблица 2 / Table 2

Содержание тяжёлых металлов (мкг/л) в снежном покрове Тайшета

Content of heavy metals (µg/L) in the snow cover of the Taishet city

Показатель Index	Зоны / Zones <i>Me (Q₂₅–Q₇₅), min-max</i>			Фоновый уровень Background level
	Селитебная / Residential <i>n</i> = 6	Рекреационная / Recreational <i>n</i> = 4	Промышленная / Industrial <i>n</i> = 3	
Cu	71.0 (60.5–81.5) 47.0–87.0	58.5 (49.3–66.5) 44.0–68.0	71.0 (68.0–76.0) 65.0–81.0	78.0
Fe	111.0 (91.5–132.0) 63.0–142.0	102.5 (84.8–128.3) 63.0–174.0	137.0 (109.0–157.0) 81.0–177.0	36.0
Zn	49.5 (40.8–71.8) 35.0–157.0	43.0 (39.3–47.5) 28.0–61.0	48.0 (41.5–102.5) 35.0–157.0	30.0
Mn	35.5 (31.3–36.8) 19.0–38.0	30.0 (26.3–35.0) 21.0–44.0	40.0 (36.5–50.5) 33.0–61.0	18.0
Cr	101.5 (79.0–112.8) 49.0–121.0	67.5 (62.8–72.0) 62.0–72.0	92.0 (90.5–94.0) 89.0–96.0	50.0
Pb	110.5 (82.5–116.8) 47.0–123.0	87.0 (85.3–88.5) 83.0–90.0	110.0 (106.0–116.0) 102.0–122.0	29.0
Cd	7.5 (4.8–8.0) 3.0–8.0	4.5 (4.0–5.0) 4.0–5.0	6.0 (5.5–6.5) 5.0–7.0	1.0
Ni	52.0 (36.5–55.5) 23.0–81.0	35.8 (30.4–41.0) 28.5–42.5	46.0 (45.3–54.5) 44.5–63.0	20.5
Hg	0.03 (0.02–0.04) 0.02–0.05	0.11 (0.03–0.27) 0.02–0.55	0.14 (0.09–0.23) 0.04–0.32	0.01

проб снега⁴. Для обработки аналитических данных применяли программы Microsoft Excel и Jamovi (version 2.3.2). Для картографирования использовали методы геоинформационного анализа, реализованные в программе QGIS. Корреляционные исследования выполнены с помощью непараметрического критерия Спирмана (r_s).

Результаты

Результаты исследований образцов снеговых талых вод на содержание ПАУ и НУ представлены в табл. 1. Медианные показатели содержания ПАУ находились в диапазоне 1,5–407,6; 0,3–55,2 и 7,1–136,8 нг/л для селитебной, рекреационной и промышленной зон соответственно. Наибольшие значения отмечены у нафталина – 94,1 нг/л (Т. 1), 2-метилнафталина – 56 нг/л (Т. 1), бифенила – 25,6 нг/л (Т. 12 и 13), аценафтилена – 57,8 нг/л (Т. 1), аценафтена – 55,9 нг/л (Т. 13), флуорена – 154,3 нг/л (Т. 10), фенантрена – 799,6 нг/л (Т. 10), антрацена – 78,6 нг/л (Т. 10), флуорантена – 591,2 нг/л (Т. 10), пирена – 414,2 нг/л (Т. 10), бенз(а)антрацена – 224,7 нг/л (Т. 9), хризена – 406 нг/л (Т. 9), бенз(б)флуорантена – 329 нг/л (Т. 9), бенз(к)флуорантена – 208,4 нг/л (Т. 9), бенз(а)пирена – 415 нг/л (Т. 9), дибенз(а,һ)антрацена – 312,6 нг/л (Т. 11), бенз(ɡ,һ,і)перилена – 319 нг/л (Т. 9).

По медианным значениям доли 2-, 3-ядерных и 4-, 5- и 6-ядерных ПАУ в селитебной и рекреационной зонах распределялись практически в равном процентном соотношении (47,8 : 52,8 и 47,2 : 52,8), в то же время в условно промышленной зоны по медиане преобладали 4-, 5- и 6-ядерные ПАУ (67%). Показатель медианы доли канцерогенных ПАУ увеличивается от селитебной зоны (26,1%) к промышленной (48,9%).

Значения медианы по НУ составили 50; 23 и 32 мкг/л для селитебной, рекреационной и промышленной зон соответственно. Наибольшее значение (60 мкг/л) отмечено в Т. 1 селитебной зоны. Результаты содержания металлов в образцах снегового покрова Тайшета представлены в табл. 2.

⁴ Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населённых пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЭ; 1990.

Концентрации тяжёлых металлов варьировались в широком диапазоне и имели неоднородный характер пространственного распределения на территории города. Медианные показатели ТМ находились в интервалах 0,03–111; 0,11–102,5 и 0,14–137 мкг/л для селитебной, рекреационной и промышленной зон соответственно. Наибольшие концентрации обнаружены у меди – в точках 11 (80 мкг/л), 7 (81 мкг/л), 13 (82 мкг/л) и 12 (87 мкг/л); цинка – в точках 7 и 11 (157 мкг/л); железа – в точках 6 (174 мкг/л) и 7 (177 мкг/л); марганца – в точке 8 (61 мкг/л); хрома – в точках 13 (116 мкг/л) и 12 (121 мкг/л); свинца – в точках 12 (118 мкг/л), 7 (122 мкг/л) и 11 (123 мкг/л); кадмия – в точках 10, 11 и 13 (8 мкг/л); никеля – в точке 10 (81 мкг/л); ртути – в точках 9 (0,32 мкг/л) и 5 (0,55 мкг/л).

Обсуждение

Атмосферные выпадения представляют собой конечный продукт нескольких сложных процессов, в том числе эмиссии первичных продуктов химических реакций, их химического преобразования в воздухе, физического переноса загрязняющих веществ в атмосфере и выпадения осадков [3, 21, 25]. Воздействие алюминиевого производства приводит к характерному изменению химического и элементного состава снежного покрова, сохраняющему информацию о происходящих химических изменениях в атмосфере за весь зимний период [8]. Уровни отдельных ПАУ в атмосферном воздухе могут изменяться на несколько порядков и обычно находятся в диапазоне концентраций от > 0,1 до нескольких сотен единиц нг/м³ [23]. Суммарные содержания ПАУ в снеговом покрове Тайшета были в диапазоне от минимального 177 нг/л (Т. 5 – рекреационная зона) до максимального 3526 нг/л (Т. 9 – промышленная зона). При этом доля канцерогенных ПАУ составляла 18,7–54,2%, а бенз(а)пирена 1,2–11,8%. В Т. 9 – у ТаАЗ (КПП № 7), ключевого техногенного источника выбросов металлургического комплекса, сжигания топлива любого вида, зафиксированы наибольшие концентрации ПАУ: бенз(а)антрацен (224,7 нг/л), хризен (406 нг/л), бенз(б)флуорантен (329 нг/л), бенз(к)флуорантен (208,4 нг/л), бенз(а)пирен (415 нг/л), бенз(ɡ,һ,і)перилен (319 нг/л). Чаще всего эти

вещества присутствуют в больших количествах в пирогенных источниках [26]. ПАУ в атмосферном воздухе имеют как природное, так и техногенное происхождение, и этим обусловлено их присутствие во всех объектах природной среды. По данным литературы, соотношения суммы низкомолекулярных ПАУ и суммы высокомолекулярных ПАУ используется для определения природы источников поступления ПАУ [27]. Рассчитанные нами индикаторные соотношения Σ низкомолекулярных ПАУ и Σ высокомолекулярных ПАУ, по которым можно выявить их вклад в загрязнение в снеговых точках опробования, показали, что в точках 1, 4, 5, 6 и 13 соотношение составляет более 1, что соответствует критериальному признаку петрогенного источника поступления. В точках 2, 3, 7–12, 14 соотношение составляет менее 1, что указывает на пирогенный источник поступления. Полученные пограничные значения соотношения в Т. 4 и 5 (1,01 и 1,05) могут свидетельствовать о смешанном характере поступления ПАУ как от пирогенных источников, так и по причине загрязнения нефтепродуктами [27].

На присутствие НУ в составе снежного покрова влияют не только выбросы автотранспорта, но и талые стоки с плотна крупного железнодорожного узла, что определяет содержание НУ 35–60 мкг/л в селитебной зоне и условной фоновой точке (31,8 мкг/л).

Анализ соотношений ПАУ на территории Тайшета показал преобладание 4-, 5-, 6-ядерных ПАУ (67%), которые преимущественно сорбированы на твердых аэрозольных частицах и могут транспортироваться воздушными потоками, оседать как вблизи источника, так и на большом расстоянии от него. Исследования подтвердили преобладание высокомолекулярных и канцерогенных ПАУ пиролитической природы в высокотемпературных источниках выбросов [26]. Доля восьми канцерогенных ПАУ возрастает от селитебной зоны (26,1%) к промышленной (48,9%).

По данным наблюдений 2019–2023 гг., высокий индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) связан прежде всего с содержанием бенз(а)пирена. Максимальные концентрации бенз(а)пирена (более 10 ПДК) отмечены почти во всех городах с высоким и очень высоким ИЗА, большинство таких городов находится в Иркутской области и Красноярском крае [28]. Расчёт показал, что кратность превышения содержания самого опасного канцерогена бенз(а)пирена относительно гигиенических нормативов, принятых для воды систем питьевого водоснабжения (централизованного и нецентрализованного), воды подземных и поверхностных водных объектов 10 нг/л (0,00001 мг/л) (СанПиН 1.2.3685–21)⁵, была в пределах 1,3–41,5 ПДК. Превышение ПДК отмечено нами во всех точках, кроме Т. 5 и 6 рекреационной зоны. В селитебной зоне Тайшета наибольшее превышение установлено в Т. 12 (13,14 ПДК), в рекреационной зоне — Т. 2 (2,17 ПДК), в промышленной зоне — Т. 9 (41,5 ПДК).

⁵ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора; 2021.

По увеличению в порядке возрастания медианного содержания растворимых форм металлов в снеговом покрове можно выстроить следующие ряды:

- селитебная зона: Hg (0,03 мкг/л) < Cd (7,5 мкг/л) < Mn (35,5 мкг/л) < Zn (49,5 мкг/л) < Ni (52 мкг/л) < Cu (71 мкг/л) < Cr (101,5 мкг/л) < Pb (110,5 мкг/л) < Fe (111 мкг/л);
- рекреационная зона: Hg (0,11 мкг/л) < Cd (4,5 мкг/л) < Mn (30 мкг/л) < Ni (35,8 мкг/л) < Zn (43 мкг/л) < Cu (58,5 мкг/л) < Cr (67,5 мкг/л) < Pb (87 мкг/л) < Fe (102,5 мкг/л); промышленная зона: Hg (0,14 мкг/л) < Cd (6 мкг/л) < Mn (40 мкг/л) < Ni (46 мкг/л) < Zn (48 мкг/л) < Cu (71 мкг/л) < Cr (92 мкг/л) < Pb (110 мкг/л) < Fe (137 мкг/л).

В фоновой точке эта последовательность выглядит следующим образом: Hg (0,01 мкг/л) < Cd (1 мкг/л) < Mn (18 мкг/л) < Ni (25 мкг/л) < Pb (29 мкг/л) < Zn (30 мкг/л) < Fe (36 мкг/л) < Cr (50 мкг/л) < Cu (78 мкг/л).

Показатели суммы коэффициентов концентрации (накопления) ПАУ в снеговом покрове на исследуемой территории возрастают в ряду Т. 5_{2,58} → Т. 6_{3,73} → Т. 8_{7,18} → Т. 3_{7,93} → Т. 2_{8,14} → Т. 7_{8,82} → Т. 4_{9,09} → Т. 1_{14,65} → Т. 13_{22,09} → Т. 12_{24,36} → Т. 10_{28,47} → Т. 9_{44,51} → Т. 11_{67,98}; коэффициента концентрации НУ — Т. 5 и 6_{0,58} → Т. 2_{0,69} → Т. 7_{0,75} → Т. 3_{0,86} → Т. 8_{0,89} → Т. 4_{0,97} → Т. 13_{1,08} → Т. 9_{1,19} → Т. 10 и Т. 11_{1,39} → Т. 12_{1,44}.

Показатели суммарного загрязнения (Zc) для металлов: Т. 1_{5,80} → Т. 2_{10,17} → Т. 4_{12,18} → Т. 6_{15,03} → Т. 8_{18,81} → Т. 12_{19,81} → Т. 13_{20,44} → Т. 10_{21,52} → Т. 11_{22,88} → Т. 3_{26,05} → Т. 7_{32,64} → Т. 9_{46,29} → Т. 5_{65,02}.

Сравнение полученных данных с результатами ранее проведенного исследования снегового покрова крупного промышленного кластера Шелехова, где ведущим источником загрязнения объектов среды обитания является филиал ПАО «Русал Братск в г. Шелехов» [29], выявило, что показатели Σ ПАУ и НУ в Шелехове были намного выше, чем в Тайшете. Так, в селитебной зоне Σ ПАУ и НУ были в 21,9 и 4,2 раза выше; в промышленной зоне — в 158,9 и 20,3 раза; в рекреационной зоне — в 151 и 15,2 раза; в фоновых точках — в 1,2 и 1,1 раза соответственно.

Заключение

Проведенный анализ снежного покрова позволяет оценить уровень загрязнений, накапливающихся в районах под действием индустриальных выбросов и смешанных пирогенных эмиссий антропогенного происхождения. Уровни загрязнения снежного покрова ПАУ, НУ и ТМ на территории Тайшета были низкими и средними, имели мозаичный разброс данных. Наибольшие показатели Σ коэффициентов концентрации (накопления) ПАУ (67,98) и НУ (1,67) отмечены в районах с многоэтажной застройкой (Т. 11 и Т. 1 соответственно) и в районе алюминиевого завода у КПП № 7 (Т. 9) — 44,51; суммарного показателя загрязнения ТМ Zc (46,29 и 65,02) — у КПП № 7 в районе алюминиевого завода (Т. 9) и очистных сооружений (Т. 5) соответственно. Корреляционный анализ между металлами и бенз(а)пиреном и другими ПАУ выявил статистически значимые средние и сильные связи между Б(а)П и фенантеном, антраценом, флуорантеном, пиреном, бенз(а)антраценом, хризеном, бенз(б)флуорантеном, бенз(к)флуорантеном, дибенз(аh)антрацен, бенз(ghi)периленом, хромом, свинцом, кадмием и никелем ($r_s = 0,641–0,978$).

Литература

1. Шаяхметов С.Ф., Рукавишников В.С., Маринайте И.И., Меринов А.В. Содержание полиаренов в воздухе рабочей зоны производства алюминия. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(4): 492–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-492-496> <https://elibrary.ru/nigvwd>
2. Шаяхметов С.Ф., Рукавишников В.С., Лисецкая Л.Г., Меринов А.В. Характеристика образующихся аэрозольных взвесей-комплексов при традиционной и модернизированной технологиях электролиза алюминия. *Медицина труда и промышленная экология*. 2022; 62(7): 452–8. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-7-452-458> <https://elibrary.ru/hfqvra>
3. Малышева А.Г., Юдин С.М. Трансформация химических веществ в окружающей среде как неучтенный фактор опасности для здоровья населения. *Химическая безопасность*. 2019; 3(2): 45–66. <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.2.16005> <https://elibrary.ru/juagyd>
4. Валеев Т.К., Рахманин Ю.А., Сулейманов Р.А., Малышева А.Г., Гимранова Г.Г., Рахматуллин Н.Р. и др. Характеристика риска для здоровья населения нефтедобывающего региона в связи с факторами среды обитания. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(11): 1310–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-11-1310-1316> <https://elibrary.ru/nsedml>
5. Май И.В., Клейн С.В., Максимова Е.В. Результативность мероприятий федерального проекта «Чистый воздух» по ключевым показателям — качеству атмосферного воздуха и риску для здоровья населения г. Братска. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(12): 1367–74. <https://elibrary.ru/zkownh>

Original article

6. Sun L., Ai X., Yao X., An Q., Liu X., Yakovleva E., et al. Relationship between atmospheric pollution and polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow during heavy pollution episodes in a cold city, northeast China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2023; 260: 115091. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115091>
7. Ali L., Alam A., Ali A.M., Teoh W.Y., Altarawneh M. A comprehensive review into emission sources, formation mechanisms, ecological effects, and biotransformation routes of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (HPAHs). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2024; 286: 117196. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117196>
8. Спицына Т.П., Тасейко О.В. Геохимическая и экологическая оценка содержания металлов в снеговой воде и поверхностных водах бассейна реки Базаихи (Красноярский край). *География и природные ресурсы*. 2022; 43(3): 52–62. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220306> <https://elibrary.ru/ziszi>
9. Лисецкая Л.Г., Шаяхметов С.Ф. Оценка уровня загрязнения снежного покрова химическими соединениями и элементами на территории Шелеховского района в Восточной Сибири. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(12): 1443–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-12-1443-1449> <https://elibrary.ru/bpwyly>
10. Зубарева О.Н., Прысов Д.А., Данилова И.В., Плясечник М.А. Мониторинг загрязнения снежного покрова селитебной территории города Красноярска. В кн.: *Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли. Материалы V Байкальской международной научной конференции – стратегической сессии*. Иркутск; 2023: 88–93. <https://elibrary.ru/eglxq>
11. Просекин С.Н., Амосова А.А., Чубаров В.М., Бычинский В.А. Оценка эколого-геохимического состояния техногенно-нагруженных пригородных районов г. Шелехова и г. Иркутска по данным снегогеохимического мониторинга. *Геосферные исследования*. 2023; (3): 140–53. <https://elibrary.ru/jskms>
12. Хлебопрос Р.Г., Тасейко О.В., Иванова Ю.Д., Михайлюта С.В. *Экологические очерки*. Красноярск; 2012.
13. Стрижма Т.П., Неустроева М.В., Перфилова О.Ю., Фертиков А.И. Оценка атмосферного воздуха города Красноярска по снеговому покрову. *Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева*. 2012; (3): 319–27. <https://elibrary.ru/phruly>
14. Игнатенко О.В. Распределение фтористых соединений в снежном покрове на территории г. Братска и Братского района. *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. 2022; (1): 231–5. <https://elibrary.ru/bmkbev>
15. Гордин Е.В. Перспективы строительства техно-городов в Сибири. *Baikal Research Journal*. 2023; 14(4): 1512–20. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2023.14\(4\).1512-1520](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2023.14(4).1512-1520)
16. Салтан Н.В., Святковская Е.А., Тростенюк Н.Н. Оценка загрязнения снежного покрова урбоэкосистем Кольского Севера в зоне влияния железнодорожных отводов. *Теоретическая и прикладная экология*. 2022; (1): 78–83. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-078-083> <https://elibrary.ru/gtdtdy>
17. Пономарева Е.М., Осинкина Т.В., Кольчугина Г.Ф. Снег как индикатор загрязнения окружающей среды города Магнитогорска: оценка количественного содержания токсикантов. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2023; (6): 29–33. <https://elibrary.ru/qpyddj>
18. Исидоров В.А. *Органическая химия атмосферы*. СПб.: Химиздат; 2001.
19. Загородняя Ю.А., Поповичева О.Б., Кобелев В.О., Стародымова Д.П., Шевченко В.П., Касимов Н.С. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Ямало-Ненецкого автономного округа как индикаторы влияния источников техногенных эмиссий. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021; 67(3): 260–79. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-261-279> <https://elibrary.ru/xnnpdr>
20. Степанец В.Н., Серых Т.Г., Папина Т.С. Оценка содержания микроэлементов в снежном покрове юга Западной Сибири. *Гидрометеорология и экология*. 2021; (64): 480–91. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-64-480-492> <https://elibrary.ru/vyrokx>
21. Макаров В.Н., Жирков А.Ф., Осипов В.П., Маркова С.А. Количественная оценка испарения и химический состав атмосферных осадков в центральной Якутии. *Криосфера Земли*. 2024; 28(6): 58–66. <https://doi.org/10.15372/KZ20240605>
22. Журба О.М., Меринов А.В., Шаяхметов С.Ф., Алексеенко А.Н. Гигиеническая оценка загрязнения тяжёлыми металлами и органическими соединениями снежного покрова многопрофильного промышленного города. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(9): 940–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-940-946> <https://elibrary.ru/hvvhd>
23. Смола В.И. *ПАУ в окружающей среде: проблемы и решения. Часть 1*. М.: Полиграф сервис; 2013.
24. EPA (Environmental Protection Agency U.S.). *Development of a relative potency factor (RPF) approach for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) mixtures*. Washington, DC; 2010.
25. Cui S., Song Z., Zhang L., Zhan Z., Hough R., Fu Q., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow in the city of Harbin in northeast China. *Atmos. Environ.* 2019; 215: 116915. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116915>
26. Новикова В.Д., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Динамика пылевой нагрузки и химического состава снежного покрова в районе расположения предприятий теплоэнергетики и коксохимии (на примере г. Кемерово). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2025; 336(3): 193–207. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/3/4984>
27. Халиков И.С. Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений. *Экологическая химия*. 2018; 27(2): 76–85. <https://elibrary.ru/xosdgh>
28. Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России». Доступно: <https://voeikovmg.ru/images/stories/publications/>
29. Журба О.М., Алексеенко А.Н., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В. Оценка содержания загрязнений в аккумулятирующих природных средах в условиях техногенной нагрузки. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(10): 1049–54. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-10-1049-1054> <https://elibrary.ru/atojrh>

References

1. Shayakhmetov S.F., Rukavishnikov V.S., Marinaite I.I., Merinov A.V. Content of polycyclic aromatic hydrocarbons in the air of the working area at aluminum production. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2025; 104(4): 492–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-492-496> <https://elibrary.ru/niqvwld> (in Russian)
2. Shayakhmetov S.F., Rukavishnikov V.S., Lisetskaya L.G., Merinov A.V. Characteristics of generated aerosol suspensions-complexes at traditional and modernized aluminum electrolysis technologies. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2022; 62(7): 452–8. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-7-452-458> <https://elibrary.ru/fhqvra> (in Russian)
3. Malysheva A.G., Yudin S.M. Transformation of chemicals in the environment as an overlooked hazard factor for public health. *Khimicheskaya bezopasnost'*. 2019; 3(2): 45–66. <https://doi.org/10.25514/CHS.2019.2.16005> <https://elibrary.ru/juagyd> (in Russian)
4. Valeev T.K., Rakhmanin Yu.A., Suleymanov R.A., Malysheva A.G., Gimranova G.G., Rakhmatullin N.R., et al. Characteristics of the risk to the health of the population of the oil-producing region associated with environmental factors. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(11): 1310–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-11-1310-1316> <https://elibrary.ru/nsedml> (in Russian)
5. May I.V., Klein S.V., Maksimova E.V. Effectiveness of the activities of the federal project «Clean air» by the quality of atmospheric air and risk for the health (by means of the example of the city Bratsk). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(12): 1367–74. <https://elibrary.ru/zkowswh> (in Russian)
6. Sun L., Ai X., Yao X., An Q., Liu X., Yakovleva E., et al. Relationship between atmospheric pollution and polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow during heavy pollution episodes in a cold city, northeast China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2023; 260: 115091. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115091>
7. Ali L., Alam A., Ali A.M., Teoh W.Y., Altarawneh M. A comprehensive review into emission sources, formation mechanisms, ecological effects, and biotransformation routes of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (HPAHs). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2024; 286: 117196. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117196>
8. Spitsyna T.P., Taseiko O.V. Geochemical and ecological assessments of metal content in snow water and surface waters of the Bazaikha river basin (Krasnoyarsk Krai). *Geografiya i prirodnye resursy*. 2022; 43(3): 52–62. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220306> <https://elibrary.ru/ziszi> (in Russian)
9. Lisetskaya L.G., Shayakhmetov S.F. Assessment of the level of pollution of the snow cover with chemical compounds and elements in the territory of the Shelekhov district in Eastern Siberia. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(12): 1443–9. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-12-1443-1449> <https://elibrary.ru/bpwyly> (in Russian)
10. Zubareva O.N., Prysov D.A., Danilova I.V., Plyashechnik M.A. Monitoring of pollution of the snow cover in the residential area of Krasnoyarsk town. In: *Snow cover, atmospheric precipitation, aerosols. Proceedings of the V Baikal International Scientific Conference – Strategic Session [Snezhnyi pokrov, atmosferynye osadki, aerizoli. Materialy V Baikal'skoi mezhduarodnoi nauchnoi konferentsii – strategicheskoi sessii]*. Irkutsk; 2023: 88–93. <https://elibrary.ru/eglxq> (in Russian)
11. Prosekin S.N., Amosova A.A., Chubarov V.M., Bychinsky V.A. Assessment of the ecological and geochemical state of Technogenously loaded suburban districts of Shelekhov and Irkutsk cities according to the data of snow geochemical monitoring. *Geosfernye issledovaniya*. 2023; (3): 140–53. <https://elibrary.ru/jskms> (in Russian)
12. Khlebopros R.G., Taseiko O.V., Ivanova Yu.D., Mikhailyuta S.V. *Ecological Essays [Ekologicheskie ocherki]*. Krasnoyarsk; 2012. (in Russian)
13. Strimzha T.P., Neustroeva M.V., Perfilova O.Yu., Fertikov A.I. Assessment of air of Krasnoyarsk city basing on snow cover. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.P. Astaf'eva*. 2012; (3): 319–27. <https://elibrary.ru/phruly> (in Russian)
14. Ignatenko O.V. Distribution of fluoride compounds in snow cover in the territory of Bratsk and Bratsk district. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2022; (1): 231–5. <https://elibrary.ru/bmkbev> (in Russian)
15. Gordin E.V. Prospects for the construction of techno-cities in Siberia. *Baikal Research Journal*. 2023; 14(4): 1512–20. [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2023.14\(4\).1512-1520](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2023.14(4).1512-1520) (in Russian)
16. Saltan N.V., Svatkovskaya E.A., Trostenyuk N.N. Assessment of snow cover pollution in urban ecosystems of the Kola North in the zone of influence of railway branches. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2022; (1): 78–83. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-078-083> <https://elibrary.ru/gtdtdy> (in Russian)
17. Ponomareva E.M., Osinkina T.V., Kolchugina G.F. Snow as an indicator of environmental pollution in the city of Magnitogorsk: evaluation of the

- quantitative content of toxicants. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2023; (6): 29–33. <https://elibrary.ru/qpydjo> (in Russian)
18. Isidorov V.A. *Organic Chemistry of the Atmosphere [Organicheskaya khimiya atmosfery]*. St. Petersburg: Khimizdat; 2001. (in Russian)
19. Zavgorodnyaya Yu.A., Popovicheva O.B., Kobelev V.O., Starodymova D.P., Shevchenko V.P., Kasimov N.S. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snowpack of Yamal-Nenets autonomous region as indicators of anthropogenic source influence. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2021; 67(3): 260–79. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-261-279> <https://elibrary.ru/xnxpdp> (in Russian)
20. Stepanets V.N., Serykh T.G., Papina T.S. Chemical composition of snow cover in the south of Western Siberia. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. 2021; (64): 480–91. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-64-480-492> <https://elibrary.ru/vyrokx> (in Russian)
21. Makarov V.N., Zhirkov A.F., Osipov V.P., Markova S.A. Quantitative assessment of evaporation and chemical composition of atmospheric precipitation in central Yakutia. *Kriosfera Zemli*. 2024; 28(6): 58–66. <https://doi.org/10.15372/KZ20240605> (in Russian)
22. Zhurba O.M., Merinov A.V., Shayakhmetov S.F., Alekseenko A.N. Hygienic assessment of heavy metal and organic compounds pollution in snow cover of a multi-industrial city. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(9): 940–6. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-9-940-946> <https://elibrary.ru/hvvhd> (in Russian)
23. Smola V.I. *PAHs in the Environment: Problems and Solutions. Part 1 [PAU v okruzhayushchei srede: problemy i resheniya. Chast' 1]*. Moscow: Poligraf servis; 2013. (in Russian)
24. EPA (Environmental Protection Agency U.S.). *Development of a relative potency factor (RPF) approach for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) mixtures*. Washington, DC; 2010.
25. Cui S., Song Z., Zhang L., Zhan Z., Hough R., Fu Q., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow in the city of Harbin in northeast China. *Atmos. Environ.* 2019; 215: 116915. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116915>
26. 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). *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. 2025; 336(3): 193–207. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/3/4984> (in Russian)
27. Khalikov I.S. Identification of natural objects contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons with the use of molecular relations. *Ekologicheskaya khimiya*. 2018, 27(2): 76–85. <https://elibrary.ru/xosdgh> (in Russian)
28. Yearbook «State of air pollution in cities on the territory of Russia». Available at: <http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/> (in Russian)
29. Zhurba O.M., Alekseenko A.N., Shayakhmetov S.F., Merinov A.V. Assessment of the content of pollutants in accumulating natural environments under conditions of anthropogenic load. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(10): 1049–54. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-10-1049-1054> <https://elibrary.ru/atojrh> (in Russian)

Сведения об авторах

Журба Ольга Михайловна, доктор биол. наук, ведущ. науч. сотр., зав. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: zhurba99@gmail.com

Рукавишников Виктор Степанович, доктор мед. наук, проф., член-корр. РАН, научный рук. ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: rvs_2010@mail.ru

Шаяхметов Салим Файзыевич, доктор мед. наук, проф., вед. науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: salimf53@mail.ru

Меринов Алексей Владимирович, канд. биол. наук, науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: alek-merinov@mail.ru

Алексеенко Антон Николаевич, канд. хим. наук, старш. науч. сотр. лаб. аналитической экотоксикологии и биомониторинга ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск, Россия. E-mail: alexeenko85@mail.ru

Information about the authors

Olga M. Zhurba, DSc (Biology), leading researcher, head, Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9961-6408> E-mail: zhurba99@gmail.com

Salim F. Shayakhmetov, DSc (Medicine), professor, leading researcher, Laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8740-3133> E-mail: salimf53@mail.ru

Viktor S. Rukavishnikov, DSc (Medicine), professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, scientific supervisor, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2536-1550> E-mail: rvs_2010@mail.ru

Alexey V. Merinov, PhD (Biology), researcher, Analytical ecotoxicology and biomonitoring laboratory, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7848-6432> E-mail: alek-merinov@mail.ru

Anton N. Alekseenko, PhD (Chemistry), senior researcher, Laboratory of analytical toxicology and biomonitoring, East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4980-5304> E-mail: alexeenko85@mail.ru