

УДК 551.510.43:622'17  
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4496  
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

## Загрязнение атмосферного воздуха отходами разработки Ермаковского флюорит-бериллиевого месторождения

А.М. Плюснин<sup>✉</sup>, Е.Р. Гарипова, А.В. Украинцев, М.К. Чернявский, Д.И. Жамбалова

*Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, г. Улан-Удэ*

<sup>✉</sup>plyusnin@ginst.ru

**Аннотация.** *Актуальность* исследования обусловлена негативным влиянием отходов горнодобывающих предприятий на экологическое состояние окружающих территорий. *Цель* работы заключается в определении миграционной способности токсичных химических элементов от мест хранения отходов разработки Ермаковского бериллиевого месторождения в воздушной среде. *Объектом* исследования является Ермаковское флюорит-берtrandит-фенакитовое месторождение и окружающая территория. *Методы:* Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, лазерная дифракция, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой. *Результаты и выводы.* Приведены результаты экспериментального исследования загрязнения приземной атмосферы отходами добычи Ермаковского флюорит-берtrandит-фенакитового месторождения с использованием установки для сбора аэрозолей над поверхностью песков. Установлено, что из толщи песков к поверхности вместе с парами воды перемещаются токсичные компоненты, образующиеся при разложении остаточной сульфидной минерализации, и продукты взаимодействия кислых вод с породами. В составе сконденсированной над песками влаги установлены высокие содержания алюминия, железа, марганца, цинка, фосфора. Эти элементы формируют ореол загрязнения атмосферы над отходами добычи и далее воздушными потоками рассеиваются на окружающей территории. В зимний период за счет ветряного рассеивания аэрозолей на обширной территории загрязняется снежный покров. Среди токсичных элементов обнаружены: бериллий, свинец, кадмий, молибден, относящиеся ко второму классу опасности. В твердом остатке снегового покрова установлена тонкая фракция пыли, размер которой менее 10 мкм, что составляет 10 % от общей массы взвешенных веществ. Ореол загрязнения снега токсичными химическими элементами и пылью удаляется от нарушенных земель на несколько километров.

**Ключевые слова:** конденсат, снежный покров, отходы добычи полезных ископаемых, микроэлементы, лантаноиды

**Благодарности:** Работа выполнена по проекту АААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока, аналитические исследования – по проекту РНФ-Бурятия 24-27-20077.

**Для цитирования:** Загрязнение атмосферного воздуха отходами разработки Ермаковского флюорит-бериллиевого месторождения / А.М. Плюснин, Е.Р. Гарипова, А.В. Украинцев, М.К. Чернявский, Д.И. Жамбалова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 69–86. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4496

---

UDC 551.510.43:622'17  
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4496

## Atmospheric air pollution from the Ermakovskoe fluorite-beryllium deposit development waste

A.M. Plyusnin<sup>✉</sup>, E.R. Garipova, A.V. Ukraintsev, M.K. Chernyavskii, D.I. Zhambalova

*Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation*

<sup>✉</sup>plyusnin@ginst.ru

**Abstract. Relevance.** Negative impact of waste from mining enterprises on the ecological state of the surrounding areas. **Aim.** To determine the migration ability of toxic chemical elements from waste storage sites of the Ermakovskoe beryllium deposit in the air. **Object.** Ermakovskoe fluorite-bertrandite-phenacite deposit and the surrounding area. **Methods.** Inductively coupled plasma mass spectrometry, laser diffraction, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. **Results and conclusions.** The paper introduces the experimental studies of surface was used atmospheric pollution by mining waste from the Ermakovskoe fluorite-bertrandite-phenacite deposit. An installation for collecting aerosols above the sand surface has used. It was established that toxic components formed during the decomposition of residual sulfide mineralization and products of the interaction of acidic waters with rocks move from the sand thickness to the surface along with water vapor. The moisture condensed over the sand contains high contents of aluminum, iron, manganese, zinc, and phosphorus. These elements form a halo of air pollution over mining waste and are then dispersed by air currents into the surrounding area. In winter, due to wind dispersion of aerosols, the snow cover becomes contaminated over a vast area. Among the toxic elements found were beryllium, lead, cadmium, and molybdenum, which belong to the second hazard class. The solid residue of the snow cover contains a fine fraction of dust, the size of which is less than 10 microns. The halo of snow contamination with toxic chemical elements and dust extends several kilometers away from the disturbed lands.

**Keywords:** condensate, snow cover, mining waste, trace elements, lanthanides

**Acknowledgements:** The work was carried out under the project AAAA-A21-121011890033-1 Geocological risks and extreme natural phenomena of Siberia and the Far East; analytical research – under the project RSF-Buryatia 24-27-20077.

**For citation:** Plyusnin A.M., Garipova E.R., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Zhambalova D.I. Atmospheric air pollution from the Ermakovskoe fluorite-beryllium deposit development waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 35, no. 11, pp. 69–86 DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4496

## Введение

Проблемы, связанные с отходами горнодобывающей деятельности, имеют глобальное значение, поскольку почти в каждой стране есть или когда-то была горнодобывающая промышленность и, следовательно, связанные с ней проблемы отходов добычи и переработки руд [1–4].

На территории России за время развития горнодобывающей деятельности накопилось огромное количество твердых отходов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. По данным федерального статистического наблюдения, за последние десять лет ежегодно образуется от 4190 до 6864 млн т вскрышных и пустых пород, что составляет более 90 % всех образуемых отходов. Более 50 % вскрышных и пустых пород направляется на размещение. Хранение вскрышных пород осуществляется главным образом в отвалах. Отвалы отходов вскрышных и пустых пород от добычи полезных ископаемых имеют значительные размеры и большую вместимость. Площадь отвалов достигает более 1500 млн м<sup>2</sup> при среднем значении около 8 млн м<sup>2</sup>. Вместимость составляет в среднем около 100 млн т и достигает более 2500 млн т [5].

Твердые отходы содержат в своем составе неустойчивые в экзогенных условиях минералы. Горные породы твердых отходов издроблены в технологическом процессе, оставшаяся после извлечения полезного компонента рудная минерализация доступна воздействию воды, кислорода и др. агентов выветривания. Отходы активно взаимодействуют с окружающей средой, многие компоненты, находящиеся в их составе, переходят в легкоподвижные формы нахождения, которые загрязняют почву,

растительность, поверхностные и подземные воды, атмосферу окружающих территорий [6].

В районах хранения отходов даже после прекращения деятельности горнодобывающих предприятий происходит загрязнение ландшафта многими токсичными химическими элементами и соединениями [7, 8].

Загрязнение тяжелыми металлами и пылью представляет серьезную угрозу для сельского хозяйства и животноводства из-за их высокой токсичности, устойчивости к разложению, способности к накоплению [9].

Настоящая статья направлена на изучение химического состава и уровня загрязнения атмосферного воздуха Ермаковского флюорит-берtrandит-фенакитового месторождения, которое было открыто в 1964–1965 гг. Г.А. Ермаковым. В 1975 г. месторождение передано Забайкальскому ГОК Минсредмаша в эксплуатацию открытым способом. Производственная структура была представлена карьерным и отвальным хозяйством, объектами дробления и теплоснабжения (котельная), рядом вспомогательных цехов. Обогащение руды осуществлялось обогатительной фабрикой в пос. Первомайском (Забайкальский край) методом флотации с получением бериллиевого и флюоритового концентратов. Площадь карьера по поверхности составляет 277,7 тыс. м<sup>2</sup>, глубина – более 70 м. С 1989 г. работа на карьере приостановлена при сохранении в недрах запасов BeO [10–12]. По завершении работ на дне карьера скопился слой атмосферных осадков глубиной до 4 м. Работы по рекультивации нарушенных земель не проводились [12].

Бериллий – один из самых токсичных элементов таблицы Менделеева. Вызывает часто смертельное заболевание легких, хроническую бериллиевую болезнь (Chronic Beryllium Disease – CBD), или бериллиоз, и внесен Агентством по охране окружающей среды (Environmental Protection Agency – EPA) в список канцерогенов класса А. Установлены ПДК для атмосферного воздуха –  $0,00001 \text{ мг/м}^3$ , для воды –  $0,0002 \text{ мг/л}$  [13]. Несмотря на растущее использование бериллия в промышленности, опубликованной информации о переносе бериллия в окружающей среде мало. Бериллий обладает высокой реакционной способностью в окружающей среде, легко гидратируется и токсичен для растений и животных даже при очень низких ( $<0,004 \text{ мг/л}$ ) концентрациях [14, 15]. Некоторые исследователи предполагают, что Ве имеет низкую подвижность в окислительных и кислых условиях. Другие исследователи сообщают, что подвижность Ве в первую очередь зависит от pH. Присутствие различных металлов, неметаллов и других соединений также влияет на токсические свойства Ве [16].

Так как бериллий представляет высокую потенциальную опасность для живых организмов, нами было исследовано воздействие на окружающую среду отходов добычи бериллиевого месторождения за счет его переноса потоками воздуха. В работе проведено исследование поведения основных токсичных элементов, поступающих в атмосферу от мест хранения отходов разработки бериллиевых руд, при длительном хранении.

### **Геологическая характеристика месторождения**

Ермаковское флюорит-берtrandит-фенакитовое месторождение располагается в центральной части Западного Забайкалья (юго-восточная часть Республики Бурятия), координаты месторождения  $51^{\circ}41' \text{ с.ш.}$  и  $109^{\circ}34' \text{ в.д.}$ . Абсолютные отметки  $700\text{--}950 \text{ м}$  над уровнем моря. Ближайший к месторождению населенный пункт – пос. Новокижингинск, находящийся в  $8 \text{ км}$  южнее. Расстояние от месторождения до г. Улан-Удэ и пос. Кижинга (центр района) составляет  $180$  и  $36 \text{ км}$ .

Ермаковское месторождение имеет большие запасы высококачественных бериллиевых руд. Оно локализовано в экзоконтактовой части штока щелочных гранитов среди толщи переслаивания карбонатных и алюмосиликатных пород. Флюорит-бериллиевые руды слагают послынные метасоматические залежи и реже жиллообразные тела, приуроченные к секущим разломам. Минеральный состав руд очень сложный. Главные минералы: флюорит, кварц, микроклин, кальцит; из бериллиевых – фенакит и берtrandит; второстепенные: альбит, сидерит, доломит, анкерит, флогопит, диопсид, везувиан, гранат, скаполит, роговая обманка, эпидот,

пирит, сфалерит, галенит, бериллиевые – миларит, лейкофан (мелинофан), эвдидимит, гельвин. Компактные залежи окружены ореолами рассеянной минерализации. Зона окисления развита очень слабо, распространяясь на глубину первых десятков метров вдоль тектонических нарушений. Химический состав руд сложный и включает большой ряд токсичных элементов: F, Be, S, Zn, Pb, Cu, Co, Mn, Cr, Cd, Mo, W и др.

Месторождение приурочено к сопке, которая изначально была покрыта соснами, она на  $100\text{--}150 \text{ м}$  возвышается над падью Зун-Шибирь. На юге и востоке месторождение окружено увалистой степью, пригодной для выпаса скота, заготовки кормов. Территория месторождения относится к типичным среднегорным степным ландшафтам [10, 11]. Карьер и отходы добычи руд располагаются на левом борту пади Зун-Шибирь, которая в верхней части имеет крутые склоны, а при выходе в долину р. Кижинги они выволаживаются. Река Кижинга протекает на удалении  $3 \text{ км}$  в северо-восточном направлении от техногенно-нарушенной территории, долина ее заболочена и покрыта кустарниковой растительностью. В зимний период формируется местное перемещение воздушных масс по пади Зун-Шибирь, где холодный воздух стекает в долину р. Кижинги.

### **Методология и методики исследования**

Вскрышные породы и отходы добычи руд расположены в лесном массиве рядом с отработанным карьером. Отвалы вскрышных пород состоят из мраморов, гранитов, габбро-диоритов, известняков, сланцев и скарнов. Отвалы вскрышных пород хорошо проницаемы для газов и воды. Основными источниками подвижных форм элементов являются участки, где происходит выветривание сульфидов – пирита, галенита и сфалерита. На этих участках происходит окисление сульфидной минерализации с образованием минеральных кислот, взаимодействующих с флюоритом, фенакитом, берtrandитом, микроклином, альбитом, слюдами, апатитом, плагиоклазом, в результате этого ряд токсичных элементов переводится в растворенное состояние и может мигрировать в составе аэрозолей, загрязняя атмосферу [17]. Хранилища вскрышных пород являются аккумуляторами влаги, поступающей из атмосферы. Из-под отвалов вытекают родники, в осенне-зимний период формируются наледи. Отвал № 2 более обводнен, из-под него в разных местах вытекают три ручья, которые затем исчезают среди песчаных образований.

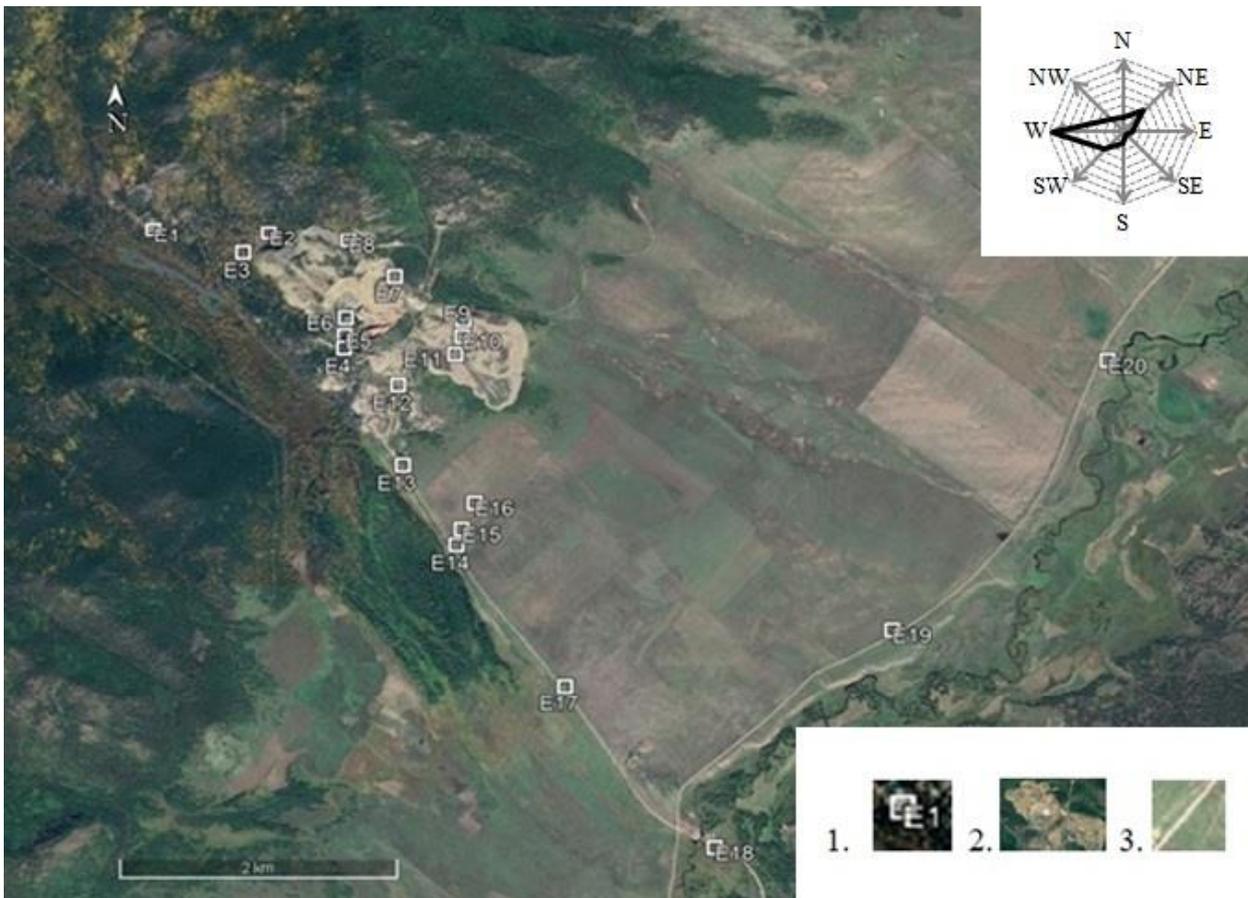
Для определения химического состава токсичных элементов, поступающих в атмосферу, на территории Ермаковского месторождения были отобраны пробы снежного покрова и конденсационной влаги.

В последние десятилетия химический состав снега стал широко изучаться при проведении исследований для лучшего понимания сложных процессов атмосферных взаимодействий, включая пути переноса и осаждения аэрозолей [18]. Химический состав снежного покрова дает представление об интегральном поступлении загрязняющих веществ в приземный слой атмосферы в течение зимнего периода, являясь своего рода природным архивом состояния воздушной среды. Химический состав аэрозолей указывает на источники их поступления, а гранулометрический и химический состав твердой и жидкой фаз – на токсичность и уровень опасности загрязнения [19]. Схема опробования снежного покрова приведена на рис. 1.

Методики отбора проб, подготовки и анализа снега подробно описаны в [20, 21]. Для отбора пробы снега на его поверхности располагалась картонная рамка размером 50×50 см ( $S=0,25 \text{ м}^2$ ). Отбор производился пластиковым совком. Снег помещали в пронумерованные полиэтиленовые мешки. Снег таял при комнатной температуре, взвесь отделялась декантацией. Полученный твердый осадок высушивался до постоянного веса и направлялся в лабораторию для определения гранулометрического и

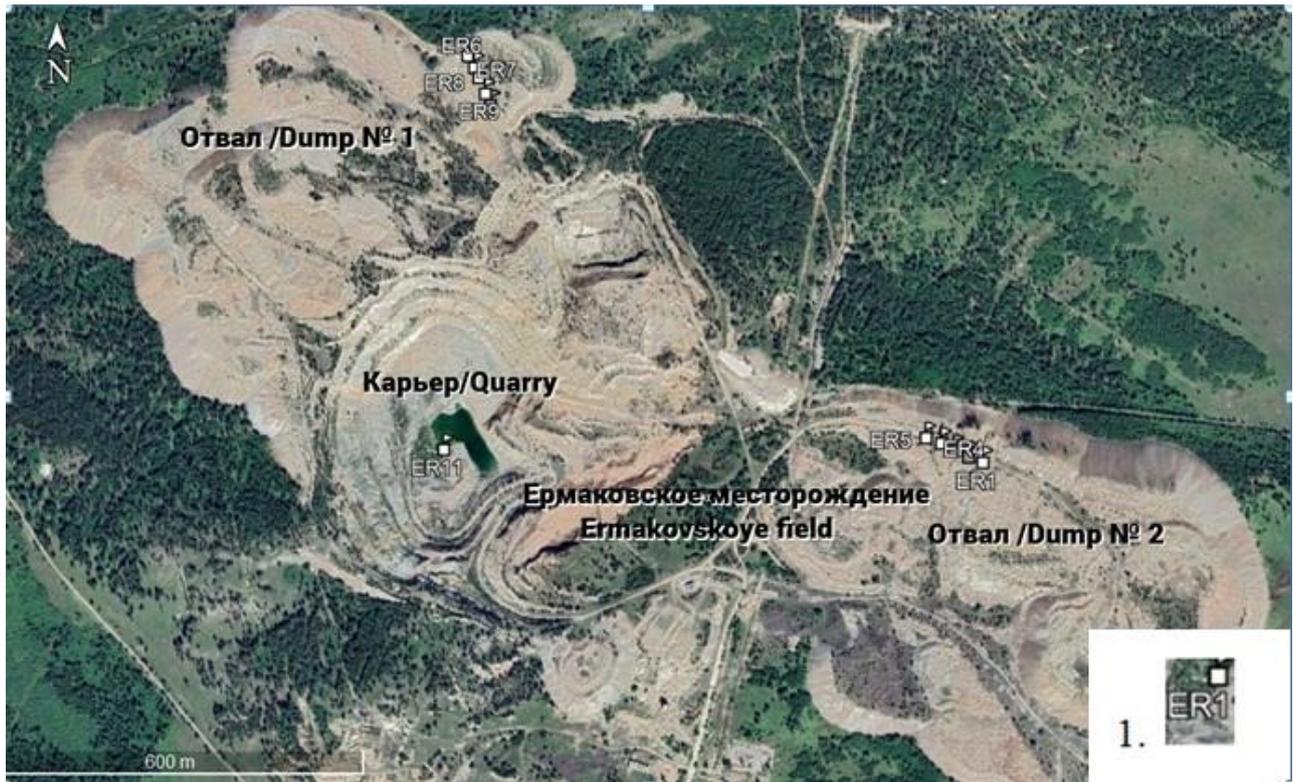
химического состава. Талая вода пропусклась через фильтр «синяя лента» и готовилась для проведения химического анализа.

Отбор проб конденсационной влаги осуществлялся на отвалах вскрышных пород № 1 и 2. Кроме этого, была отобрана проба воды из водоема, образовавшегося на дне карьера. Схема приведена на рис. 2. Для сбора конденсационной влаги использовалась установка, которая представляет собой пластиковый герметичный цилиндрический корпус высотой 40 см. На корпус сверху натягивается пленочный прозрачный водонепроницаемый материал и фиксируется резиновым жгутом. В центр на пленочный материал помещается груз массой 200–300 г, не имеющий острых граней. В центре под пленкой устанавливалась пластиковая чашка для сбора конденсата. Площадь поверхности, с которой производится сбор конденсата, составляет  $1 \text{ м}^2$ . Сборник конденсата устанавливался на точке наблюдения вечером на всю ночь. Утром накопившаяся конденсационная влага сливалась в пластиковую посуду, затем фильтровалась через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и готовилась для проведения химического анализа.



**Рис. 1.** Спутниковый снимок со схемой мест отбора проб снега. Условные обозначения: 1 – места отбора проб снега, 2 – Ермаковское месторождение, 3 – дорога

**Fig. 1.** Satellite image with a scheme of snow sampling sites. Legend: 1 – snow sampling sites, 2 – Ermakovskoe deposit, 3 – road



**Рис. 2.** Спутниковый снимок со схемой опробования конденсационной влаги. Условные обозначения: 1 – места отбора проб конденсата

**Fig. 2.** Satellite image with a scheme for sampling condensation moisture. Legend: 1 – condensate sampling sites

Отбор пробы воды из водоема, расположенного в карьере, для определения микроэлементов производили одноразовым медицинским шприцом объемом 10 мл в количестве 2 мл. Пробу фильтровали через одноразовый полистирольный стерильный шприц-насадку и помещали в предварительно взвешенную полипропиленовую пробирку, содержащую 40 мкл 70 %  $\text{HNO}_3$ .

Отбор проб снега на территории Ермаковского месторождения и окружающей территории осуществлялся 22.02.2022. Опробование воды и конденсата проводилось в период с 05.09.2022 по 06.09.2022. Всего отобрано 23 пробы, из них 20 проб снега, 2 пробы конденсационной влаги и 1 проба из водоема, образовавшегося на дне карьера.

Пробы воды, конденсата и талого снега были направлены для анализа на содержание микроэлементов, который проводился в лаборатории водной микробиологии Лимнологического института СО РАН (г. Иркутск) методом индуктивно связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 се по опубликованной методике [22].

Анализ макрокомпонентного состава талого снега выполнен в лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) с использованием стандартных методик. Пробы твердых осадков, предназначенные для проведе-

ния гранулометрического анализа, были предварительно озолены для удаления органических веществ. Озоление проб проводилось в соответствии с ГОСТ 27784-88. Гранулометрический состав проб определялся в лаборатории почвенно-физических процессов Института почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск) методом лазерной дифракции на приборе Fritsch analysette 22 MicroTec. Диапазон измерения как при диспергировании в жидкости, так и в сухом диспергировании равен 0,1–600 мкм, длина волны лазера – 655 нм в соответствии с ГОСТ Р 8.777-2011 (аналитик Д.А. Филимонова). Содержания макро- и микроэлементов в твердом остатке снега определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) с использованием спектрометра iCAP Pro XP Duo («Thermo Scientific», США) в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск). Минерализация образцов проводилась согласно методике «четырёх кислот», описанной в работе [23].

### Полученные результаты

В табл. 1 приведен макрокомпонентный состав снежного покрова. Представленные значения являются средними арифметическими из двадцати проанализированных проб.

**Таблица 1.** Макрокомпонентный состав снежного покрова, мг/дм<sup>3</sup>

**Table 1.** Microcomponent composition of snow cover, mg/dm<sup>3</sup>

K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH	Формула Курлова Kurlov's formula
0,09–1,03	0,11–2,08	1,8–6,81	0,24–1,82	1,06–2,84	0,06–0,22	0,33–2,63	6,71–27,46	5,73–6,39	$_{0,018}\text{HCO}_3\text{72Cl20}$ Ca54Mg23Na15
0,43	0,57	2,92	0,74	1,81	0,11	0,76	10,98	6,09	

**Таблица 2.** Микроэлементный состав снежного покрова по результатам анализа 20 проб, мкг/дм<sup>3</sup>

**Table 2.** Trace element composition of snow cover based on the results of analysis of 20 samples, mkg/dm<sup>3</sup>

Элемент/Element	Al	Si	P	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Y	Zr	W	Th
П.О./LOD	0,3	4	5	0,04	0,03	1	0,001	0,05	0,5	0,0003	0,0005	0,0009	0,0008
Байкал/Baikal	2	790	23	0,16	0,119	3,3	0,037	0,16	14	0,0035	0,006	0,045	0,0042
E1	24	470	44	0,58	4,8	34	0,077	1,18	17,5	0,095	0,043	0,046	0,01
E2	21	111	57	0,5	4,1	36	0,047	0,29	22	0,044	0,027	0,048	0,0063
E3	10,2	59	34	0,26	3,5	29	0,04	0,13	6,1	0,012	0,012	0,056	0,0054
E4	25	41	34	0,34	5,3	15,9	0,065	0,16	6,1	0,021	0,019	0,051	0,0023
E5	21	47	34	0,34	4,2	26	0,048	0,1	7,3	0,014	0,013	0,04	0,004
E6	34	54	29	0,42	8,5	19	0,137	0,27	7,2	0,021	0,023	0,035	0,0029
E7	28	58	33	0,57	6	24	0,076	0,38	7,4	0,015	0,019	0,045	0,0026
E8	13,3	44	55	0,28	5,7	30	0,047	0,24	3,5	0,014	0,013	0,04	0,008
E9	24	45	41	0,73	4,1	38	0,041	0,36	3,6	0,027	0,029	0,048	0,0064
E11	11,8	220	63	0,2	3,1	39	0,044	0,37	2,8	0,038	0,019	0,043	0,0048
E12	10	82	30	0,26	6,5	18,2	0,093	0,17	3,2	0,017	0,012	0,13	0,0038
E13	19	51	41	0,56	3,4	29	0,044	0,26	4,3	0,03	0,14	0,049	0,48
E14	24	49	73	0,78	4,5	32	0,069	1,23	18	0,041	0,033	0,049	0,068
E15	39	69	71	0,88	3,9	41	0,035	0,12	3,5	0,044	0,017	0,053	0,034
E16	21	390	38	0,39	2,7	30	0,037	0,22	3,4	0,094	0,027	0,047	0,033
E17	23	65	57	0,67	5,4	30	0,051	0,79	6,4	0,027	0,027	0,082	0,021
E18	24	82	40	0,6	6,5	24	0,054	0,5	7	0,04	0,019	0,21	0,017
E19	26	72	62	0,61	13,8	41	0,101	0,36	5,8	0,032	0,049	0,18	0,025
E20	72	125	89	2,1	13,7	84	0,131	1,77	14,3	0,069	0,066	0,49	0,019
Среднее значение отобранных проб Average	25,7	110	49	0,64	6,0	33,4	0,066	0,49	7,8	0,037	0,034	0,09	0,038
Среднее/Байкал Average/Baikal	12,8	0,14	2,1	4	50,4	10,1	1,8	3,1	0,56	10,6	5,7	2	9,05

Примечание: ПО – предел обнаружения методики анализа. Байкал – содержание элементов в стандарте Байкальской воды по данным Лимнологического института СО РАН, г. Иркутск.

Note: LOD is the analysis technique limit of detection. Baikal – content of elements in the Baikal water standard according to Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk.

Среднее значение общей минерализации составляет 18,3 мг/л. Средний химический состав представлен в виде формулы Курлова. В анионном составе преобладает гидрокарбонат-ион, в катионном составе – кальций. Установлено, что талый снег имеет слабокислую реакцию (pH 5,73–6,39).

Приведенные в табл. 2 концентрации микроэлементов во всех пробах значительно выше предела обнаружения примененной методики анализа, что гарантирует достоверность полученных результатов. В микроэлементном составе наиболее высокими содержаниями выделяются кремний, фосфор, железо, алюминий. В таблице приведено сравнение содержания микроэлементов, установленных в снежном покрове, с их концентрацией в озере Байкал. В данном случае химический состав воды озера Байкал взят в качестве регионального фона. Байкальская вода имеет минерализацию в среднем 96 мг/л, а снеговые воды в исследуемом районе, по

нашим данным, составляют 18,3 мг/л, т. е. в 5,2 раза меньше. Из всех представленных в таблице химических элементов только кремний имеет, безусловно, более высокое содержание в Байкале, что, несомненно, связано с широким распространением в Байкале планктона, который имеет панцирь, содержащий кремний. Содержание цинка в Байкальской воде больше, чем в снеге на исследуемой территории, но с учетом более низкой общей минерализации воды его концентрация становится сопоставимой с байкальской водой, и, вероятно, она отражает общие региональные закономерности, характерные для растворения этого химического элемента. Для всех других приведенных в таблице микроэлементов характерны более высокие концентрации в снеговой воде, чем в Байкале. Вероятно, это связано с активизацией процессов их растворения на этой территории, нарушенной при разработке месторождения. Наиболее высокие относи-

тельные концентрации установлены для марганца. Этот элемент, так же, как и железо, присутствует в породах в виде карбонатных минералов, образовавшихся на рудной и пострудной стадии формирования месторождения [24]. Он легко переходит в раствор при выветривании пород, заключенных в отвалах, и мигрирует в поровых водах к поверхности земли в виде карбонатных комплексных соединений. Из карбонатов также легко переходит в раствор железо, но затем в растворе оно под воздействием кислорода воздуха окисляется до степени окисления +3 и гидролизуются, формируя осадок гидроокислов железа. Относительно высокие содержания алюминия и фосфора в снеге связаны с тем, что эти элементы поступают в поровые воды в результате гидролиза алюмосиликатов и фосфатов. На этом месторождении широко распространены калиевый полевои шпат и фторапатит. При разработке месторождения они были издроблены в технологическом процессе, под воздействием воды и кислорода происходит их интенсивное разложение. Интересным фактом стало установление в снежном покрове относительно высоких содержания иттрия. Этот элемент, относящийся к группе редкоземельных элементов, связан с заключительной стадией формирования месторождения, когда наблюдался интенсивный поток флюида углекислого газа в гидротермальной системе. В это время образовались монацит, ксенотим, паризит, содержащие в своем составе редкоземельные элементы. Выветривание этих минералов и привело к формированию аномальных содержания иттрия.

Рассмотрим поведение в потоках рассеяния, сформировавшихся в снежном покрове, высокотоксичных микроэлементов – бериллия, кадмия, свинца, молибдена, которые относятся ко второй группе токсичности.

Известно, что бериллий плохо мигрирует в водных растворах, в нейтральной и даже в слабнокислой среде. Но в снежном покрове, где господствуют слабнокислые условия, установлена значительная дисперсия в его распределении. Концентрация в пробах снега изменяется более чем в 50 раз. Гистограмма распределения концентрации бериллия в пробах снежного покрова представлена на рис. 3, а. В основном концентрация бериллия в пробах снега не превышает  $0,005 \text{ мкг/дм}^3$ , такая концентрация установлена в 11 пробах. Такие содержания в снеге, вероятно, возникают в результате воздействия горных пород с фоновой концентрацией бериллия. Другая группа проб снега отражает воздействие горных пород, подвергшихся воздействию рудного процесса. Пробы снега, содержащие более  $0,005 \text{ мкг/дм}^3$  бериллия, были отобраны как в пределах хранилищ отходов разработки месторождения, так и на значительном удалении от мест хранения и нарушенного техногенезом ландшафта (рис. 3, б), что указывает на принципиальную возможность миграции бериллия в атмосфере на значительные расстояния.

Наиболее высокая его концентрация установлена в пробе Е-7 ( $0,046 \text{ мкг/дм}^3$ ), которая отобрана в пределах отвала вскрышных пород № 2. Вторая проба с аномально высоким содержанием бериллия установлена на удалении 3 км к юго-востоку от расположения карьера и отвалов вскрышных пород. Проба была отобрана на берегу реки Кижинга, долина которой вытянута в северо-восточном направлении. В этой же долине к северо-востоку от точки опробования с аномальным содержанием бериллия установлено повышенное содержание этого элемента, достигающее  $0,019 \text{ мкг/дм}^3$ .

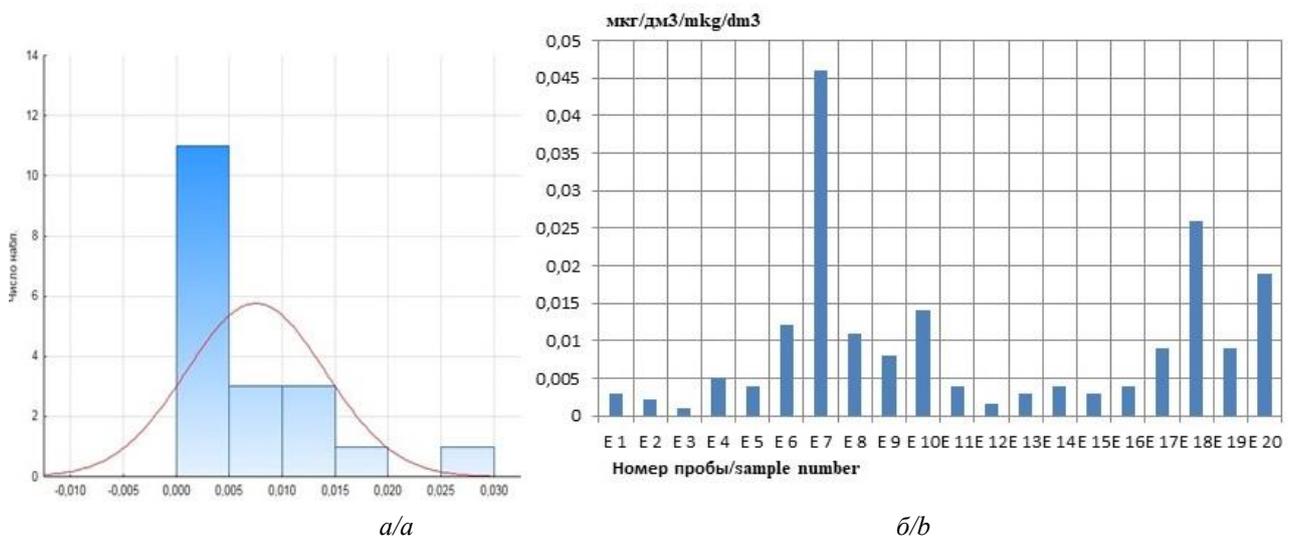
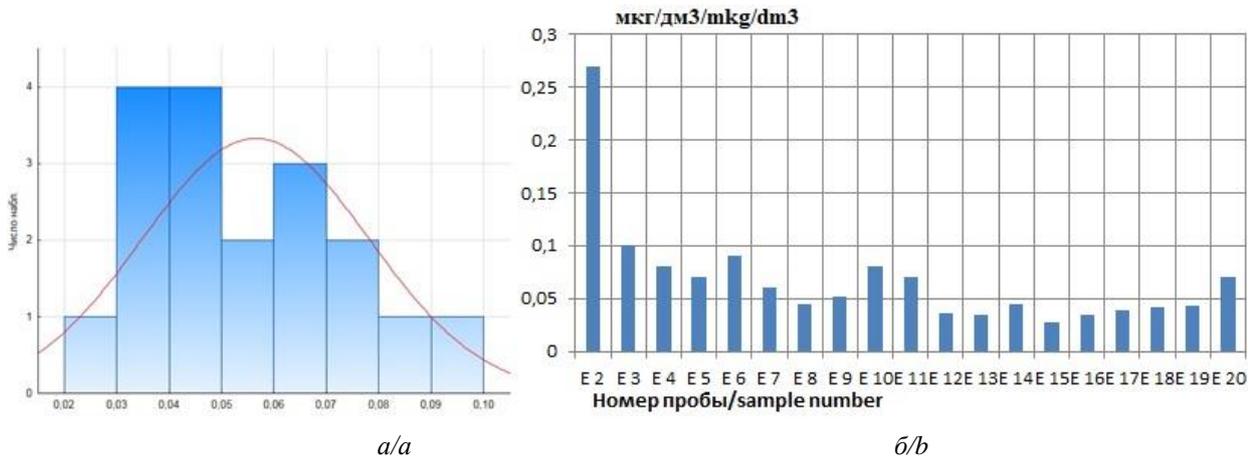


Рис. 3. Гистограммы распределения бериллия по содержанию (а) и по месту отбора проб снега (б).  
Fig. 3. Histograms of beryllium distribution by content (a) and by location of snow sampling (b)



**Рис. 4.** Гистограммы распределения кадмия по содержанию (а) и по месту отбора проб снега (б). Примечание: В пробе E1 обнаружены аномальные содержания кадмия, для того чтобы на гистограмме (б) наглядно представить распределение кадмия, проба E1 была исключена из нее

**Fig. 4.** Histograms of cadmium distribution by content (a) and by location of snow sampling (b). Note: Anomalous cadmium contents were found in sample E1; in order to visualize cadmium distribution in the histogram (b), sample E1 was excluded from it

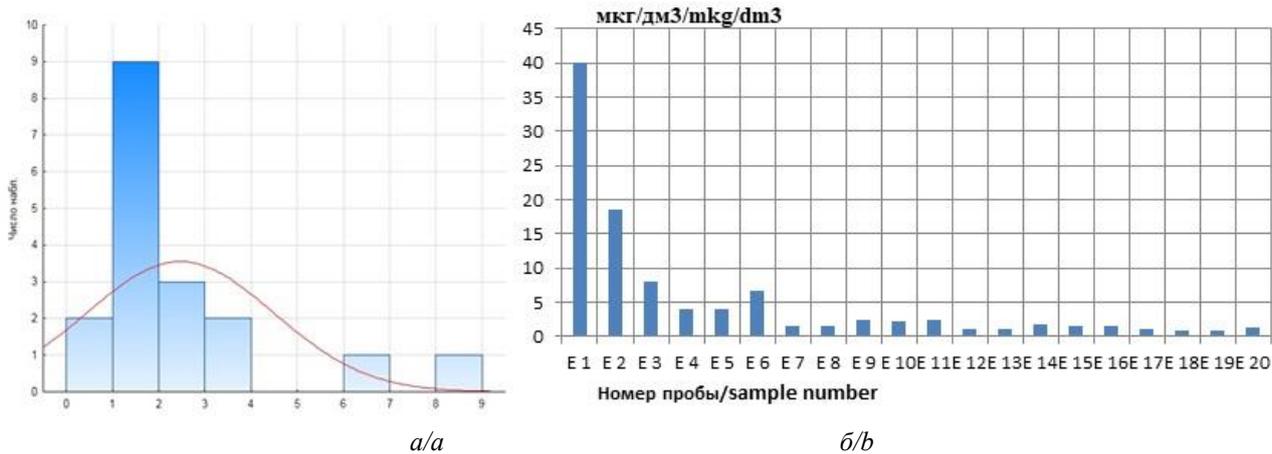
Нужно отметить, что содержание бериллия в снеге имеет большую изменчивость, чем в поверхностных и подземных водах этого района [17]. Это указывает на его большую подвижность в атмосфере, чем в гидросфере. А учитывая, что этот элемент относится ко второй группе токсической опасности и оказывает негативное воздействие на органы дыхания, очень важно установить механизм поступления его в атмосферу и перенос воздушными потоками.

Пространственное распределение в снежном покрове других высокотоксичных элементов, относящихся ко второй группе (кадмий, молибден и свинец), имеет другой характер. Их аномальные содержания установлены в основном в пределах нарушенной при разработке месторождения территории. Несколько проб снега, загрязненного свинцом и кадмием, оказалось в северо-западной части исследованной территории, в том числе и за пределами лицензионного участка. Это может быть связано с тем, что эти элементы в определенных условиях могут мигрировать в водных растворах. За счет этого на нарушенной территории формируется вторичный ореол загрязнения, представленный растворимыми солями. При выпадении снега они могут попадать в его состав.

Гистограмма распределения содержаний кадмия имеет два пика. Среднее значение для первого экстремума составляет 0,04  $\text{мкг/л}$ , для второго экстремума – 0,065  $\text{мкг/л}$ . Такое распределение содержаний кадмия может указывать на его поступление из двух разных источников. Аномальными концентрациями можно считать значения больше 0,065  $\text{мкг/дм}^3$ . Наиболее высокие значения установлены в снежном покрове к северо-западу от технологической площадки, созданной для разработки месторождения.

Здесь содержание кадмия составляет 2,3  $\text{мкг/дм}^3$ , что значительно выше ПДК рыбохозяйственного значения. Содержания этого токсичного элемента, превышающие среднюю концентрацию первого экстремума, захватывают всю территорию складирования отходов добычи и удаляются за его пределы, захватывая долину реки Кижинги. На рис. 4, б приведена гистограмма распределения концентраций кадмия на исследуемой территории без учета максимально установленного значения. На представленной диаграмме видно, что основная масса проб снега с высоким содержанием кадмия отобрана в пределах нарушенной территории, но и на удалении в пределах не нарушенного ландшафта концентрация этого элемента высокая. В точке E14 концентрация кадмия – 0,045  $\text{мкг/дм}^3$ , E18 – 0,042  $\text{мкг/дм}^3$ , E19 – 0,043  $\text{мкг/дм}^3$ , E20 – 0,07  $\text{мкг/дм}^3$ .

На гистограмме (рис. 5), построенной по содержаниям свинца, наблюдается разделение проб на две ярко выраженные группы. Содержание свинца в основной массе проб распределяется в интервале 0,77–4  $\text{мкг/дм}^3$ . В этот интервал укладывается 16 отобранных проб снега. В четырех пробах обнаружены аномально высокие концентрации свинца. В них содержания достигают значений больше 6  $\text{мкг/дм}^3$ . Такие концентрации установлены в пробах снега, отобранных к северо-западу от карьера и отвалов № 1 и 2, где хранятся вскрышные породы. Нужно отметить, что эта концентрация является предельно допустимой для вод рыбохозяйственного значения. То есть талые воды, образующиеся в результате таяния снега на этой территории, наносят вред рыбным ресурсам реки Кижинги. Но сам факт обнаружения в снежном покрове высоких содержания свинца заслуживает детального рассмотрения.



**Рис. 5.** Гистограммы распределения свинца по концентрации (а) и по месту отбора проб снега (б)  
**Fig. 5.** Histograms of lead distribution by concentration (a) and by location of snow sampling (b)

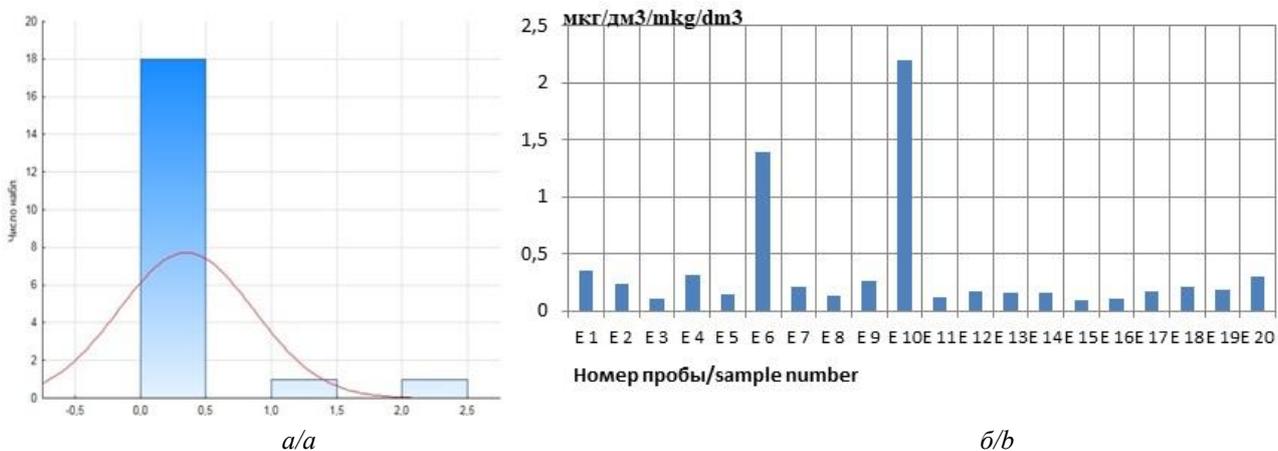
Свинец считается малоподвижным в воде, его потоки рассеяния, как правило, ограничиваются рудными телами месторождений, хвостохранилищами, где господствует окислительная обстановка и распространены кислые воды. А в рассматриваемом случае свинец в воздушной среде удаляется на значительное расстояние от техногенных объектов горнодобывающего производства. Максимальная концентрация свинца достигает в точке E1 –  $40 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ , E2 –  $18,6 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ , E3 –  $8,1 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ .

В снежном покрове в двух пробах установлены высокие содержания молибдена, которые превышают предельно допустимую концентрацию для вод рыбохозяйственного значения, которая составляет  $1 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ . На рис. 6 представлены гистограммы распределения концентраций молибдена на исследуемой территории. Молибден слабо подвижен в водных потоках рассеяния, так как плохо мигрирует в кислой среде, которая обычно формируется в зоне окисления, в том числе и на молибденовых месторождениях. А в воздушной среде его подвиж-

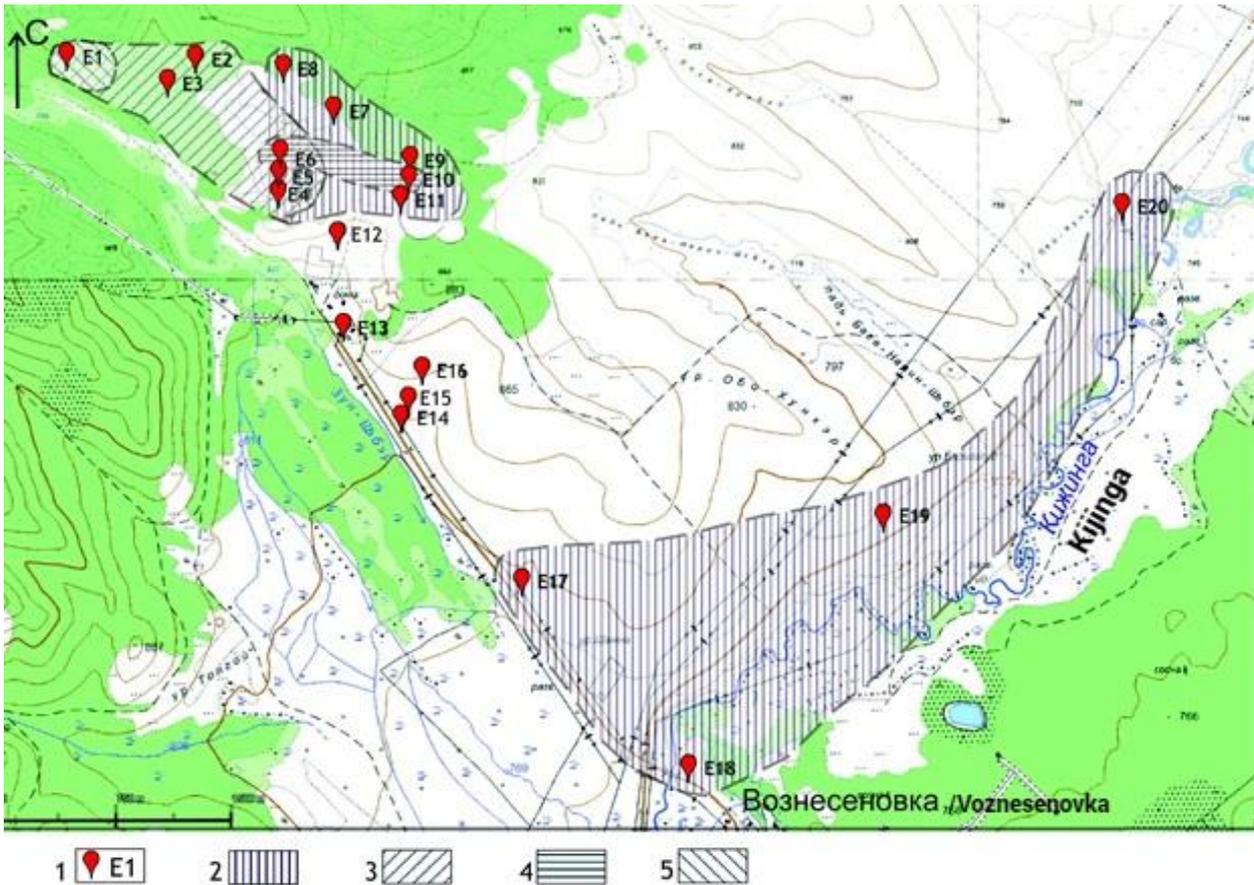
ность оказалась более значительной. Без учета аномальных значений распределение содержаний молибдена по пробам снега носит нормальный характер с медианой  $0,18 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ . Вероятно, аномальные содержания связаны с разложением молибденита в щелочных условиях.

На рис. 7 представлена карта распределения аномальных концентраций химических элементов второй группы токсичности, содержащихся в снежном покрове исследуемой территории. В основном снег загрязнен этими токсичными элементами в пределах нарушенной горными работами территории. Загрязнение в северо-западной части этой территории, вероятно, связано со стоянкой автотранспорта.

Было определено содержание лантаноидов в пробах снега. Установлено, что они имеют относительно высокие концентрации, суммарное содержание составляет  $0,2076 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ . Наблюдается значительная дисперсия в распределении по исследованной площади (рис. 8, а, б).

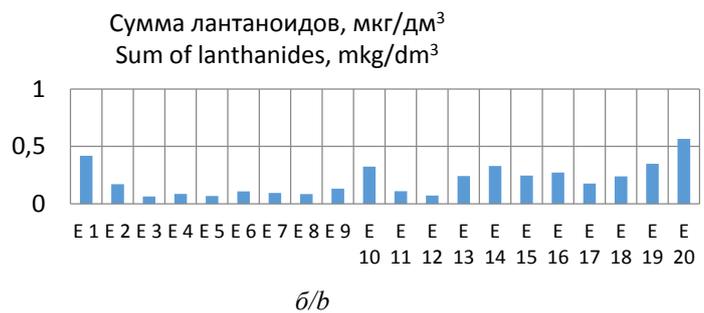
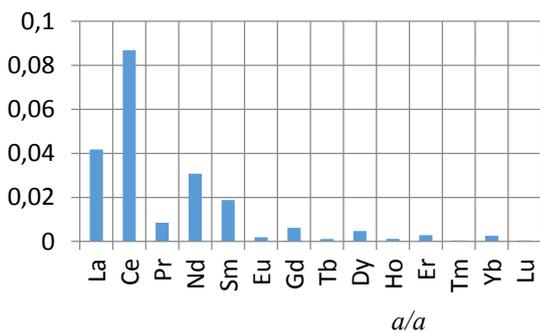


**Рис. 6.** Гистограммы распределения молибдена по концентрации (а) и по месту отбора проб снега (б)  
**Fig. 6.** Histograms of molybdenum distribution by concentration (a) and by snow sampling location (b)



**Рис. 7.** Карта распределения аномальных концентраций химических элементов второй группы токсичности в снежном покрове на лицензионном участке Ермаковского ГОК и окружающей территории. Условные обозначения: 1 – места отбора проб снега; ареолы распределения аномально концентраций: 2 – Be, 3 – Pb, 4 – Mo, 5 – Cd

**Fig. 7.** Map of the distribution of anomalous concentrations of chemical elements of the second toxicity group in the snow cover at the license area of the Ermakovskoe Mining and Processing Plant and the surrounding area. Legend: 1 – snow sampling sites; areola distribution of anomalous concentrations: 2 – Be, 3 – Pb, 4 – Mo, 5 – Cd



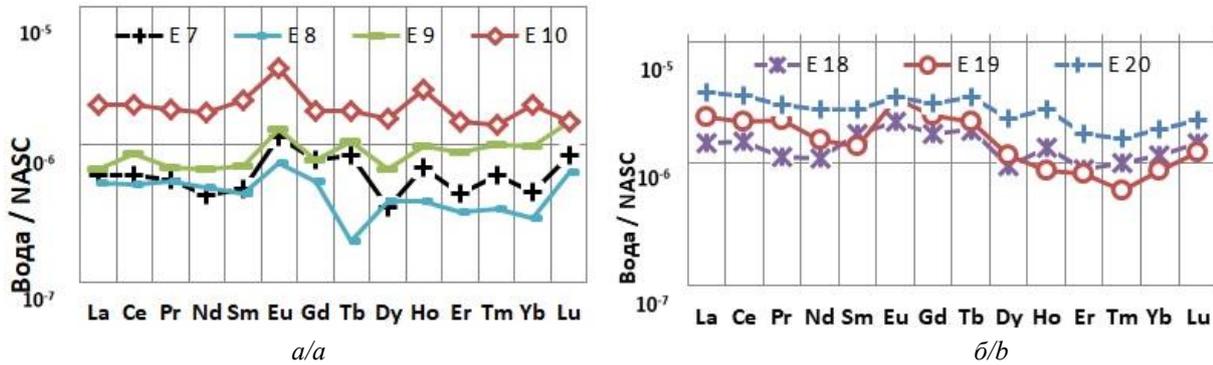
**Рис. 8.** Распределение суммарного содержания лантаноидов в снежном покрове (а) и их суммарной концентрации в пробах снега (б)

**Fig. 8.** Distribution of the total content of lanthanides in the snow cover (a) and their total concentration in snow samples (b)

Преобладают в снежном покрове легкие лантаноиды, наиболее высокая концентрация характерна для церия. Распределение суммарного содержания лантаноидов по пробам показывает, что наиболее высокие концентрации характерны для проб, которые отобраны на удалении от мест хранения отхо-

дов разработки месторождения; так, самое большое содержание установлено в пробе снега, отобранной в долине реки Кижинги.

На рис. 9 представлены графики распределения лантаноидов, нормированные относительно стандарта NASC.



**Рис. 9.** Распределение лантаноидов в снеге, нормированных относительно NASC (North American Shale Composite) [25]: а) в пределах техногенно-нарушенной горными работами территории; б) на окружающей территории – на землях сельскохозяйственного назначения

**Fig. 9.** Distribution of lanthanides in snow, normalized relative to North American shale composite (NASC) [25]: (a) within the territory disturbed by man-made mining operations; (b) in the surrounding territory, on agricultural lands

Распределение лантаноидов в снеге на нарушенной территории и на удалении трех километров имеет односторонний характер. Наблюдается небольшое преобладание легких над тяжелыми элементами, выделяется европиевый максимум, что характерно для руд и вмещающих оруденение пород Ермаковского месторождения [26]. На территории, подверженной техногенным изменениям, наблюдаются значимые различия в концентрациях элементов с сохранением общей тенденции в распределении. Вероятно, в этом проявляется дисперсия в содержаниях этих элементов в рудах, околорудно измененных и вскрышных породах. В пробах, отобранных на удалении от техногенно-нарушенной территории, лантаноиды имеют более сглаженное синхронное распределение, наблюдаются меньшие различия в концентрации лантаноидов. Оно близко распределению РЗЭ в точке наблюдения E7, где установлено аномально высокое содержание бериллия. Вероятно, отвал вскрышных пород № 2 (пр. E7) вносит наиболее значимый вклад в загрязнение окружающей территории РЗЭ и бериллием.

### Обсуждение полученных результатов

Загрязнение снежного покрова и талых вод может происходить под воздействием испарения воды из озера, расположенного в карьере, испарения из рыхлых образований, которые размещены на техногенно-нарушенной территории, и при десорбции с поверхности твердых частиц при плавлении снега.

В пробе воды из водоема, расположенного в карьере, установлено, что значение общей минерализации составляет 620 мг/л, вода имеет щелочную реакцию, рН достигает значения 8,4.

При проведении экспериментальных работ на отвалах вскрышных пород Ермаковского месторождения было установлено 10 конденсаторов для сбора влаги, но конденсат удалось отобрать только в двух местах. Это связано с тем, что отвалы сло-

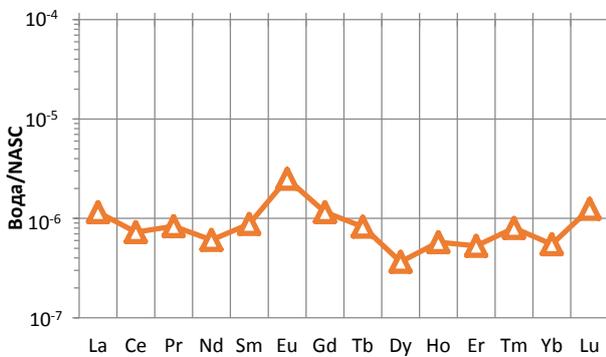
жены хорошо проницаемыми горными породами, поэтому атмосферные осадки, выпадающие на этой территории, проникают на большую глубину. Зона аэрации в пределах вскрышных пород составляет более пяти метров. Во время опробования грунтовые воды располагались на значительной глубине, и сформировавшаяся от них капиллярная кайма не достигала поверхности земли. Конденсат удалось собрать в понижениях рельефа. По результатам исследования проб конденсационной влаги на отвале вскрышных пород № 1 общая минерализация составляла 66 мг/л, а на отвале № 2 конденсат имел минерализацию 370 мг/л. Микроэлементный состав конденсата приведен в табл. 3.

Несмотря на значительную минерализацию воды в карьерном озере, содержание большинства определенных микроэлементов здесь значительно ниже, чем в конденсате, собранном над отвалами вскрышных пород. Исключение составляют только молибден, стронций и уран. Относительно высокие содержания молибдена и урана в воде озера обусловлены щелочной средой, создавшейся при взаимодействии атмосферных осадков с породами. Щелочная среда благоприятствует растворению и накоплению в растворе химических элементов, для которых характерна миграция в форме анионов. Также в воде озера, расположенного в карьере, обнаружены относительно высокие содержания редкоземельных элементов, суммарное содержание лантаноидов составляет 0,1384 мкг/л. Вода обогащена группой легких редкоземельных элементов, наблюдается европиевый максимум (рис. 10). Большое содержание РЗЭ, соотношения между легкими и тяжелыми лантаноидами, проявление европиевой аномалии отражают динамичную обстановку формирования месторождения с большими градиентами физико-химических условий рудоотложения во времени и в пространстве, что характерно для этого уникального месторождения [27].

**Таблица 3.** Содержание химических элементов в карьерном озере и в конденсате, собранном на отвалах вскрышных пород Ермаковского месторождения, мкг/дм<sup>3</sup>

**Table 3.** Content of chemical elements in a quarry lake and in condensate collected from overburden dumps of the Ermakovskoe deposit, mkg/dm<sup>3</sup>

Элемент Element	П.О. LOD	Байкал Baikal	Конденсат на отвале/Condensate on the dump		Озеро в карьере Lake in a quarry
			1	2	
Be	0,001	<0,001	0,06	0,35	0,039
Al	0,3	3,4	72	135	16,8
P	10	24	330	760	36
Ti	0,02	0,19	3,9	7,8	2,6
V	0,002	0,4	0,58	2,5	2,1
Cr	0,003	1,2	1,83	3,2	0,21
Mn	0,002	0,117	45	320	8,4
Fe	1	5	114	189	24
Co	0,001	0,045	0,52	3,7	0,3
Ni	0,005	0,22	4,5	13,1	0,19
Cu	0,005	1,31	23	39	3,6
Zn	0,5	18,4	123	179	30
Br	0,7	9,6	16,8	88	23
Rb	0,0007	0,62	5,9	13,6	9,5
Sr	0,0002	108	24	153	390
Y	0,0002	0,0048	0,179	0,47	0,022
Zr	0,003	0,007	0,2	0,36	0,032
Nb	0,0001	0,0004	0,014	0,023	0,0032
Mo	0,005	1,35	2	42	147
Cd	0,0005	0,0027	0,26	1,15	0,25
Ba	0,005	10,1	13,1	59	18,8
W	0,0005	0,051	0,09	0,48	0,3
Pb	0,002	0,081	2,5	5,2	0,67
Th	0,0002	<0,0002	0,046	0,084	0,0035
U	0,0002	0,58	0,07	2,2	9,5



**Рис. 10.** Содержание редкоземельных элементов в пробах воды озера, расположенного в карьере Ермаковского месторождения, нормированное по отношению к NASC

**Fig. 10.** Content of rare earth elements in water samples of a lake located in the quarry of the Ermakovskoe deposit, normalized in relation to NASC

В конденсационной воде обнаружены очень высокие концентрации фосфора, марганца, железа, цинка, алюминия, меди, свинца, бериллия, иттрия, циркония и др. Полученные экспериментальные данные показывают, что отходы добычи бериллиевых руд являются мощным поставщиком высокотоксичных элементов в атмосферу. На отвале № 2 концентрация токсичных элементов в конденса-

ционной влаге несколько выше, чем на отвале № 1, что, вероятно, связано с разными условиями хранения отходов и неравномерным распределением в них рудной минерализации. По нашим представлениям, токсичные химические элементы попадают в приземную атмосферу вместе с поровыми водами, которые заключены в хранилищах. За счет капиллярных сил поровые воды поднимаются к поверхности, испаряются, и вместе с аэрозолями воды растворенные вещества попадают в атмосферу и далее переносятся воздушными потоками [7]. Загрязнение атмосферы в местах хранения отходов в Забайкалье происходит, если вода в жидком состоянии находится на глубине 1,5–2,5 м. Обычно это наблюдается в хвостохранилищах. Но, как показывает проведенное исследование, вскрышные породы также могут быть поставщиком токсичных веществ в атмосферу. В толще складированных пород даже в зимнее время длительное время сохраняется вода, за счет которой возле отвалов ежегодно формируются наледи.

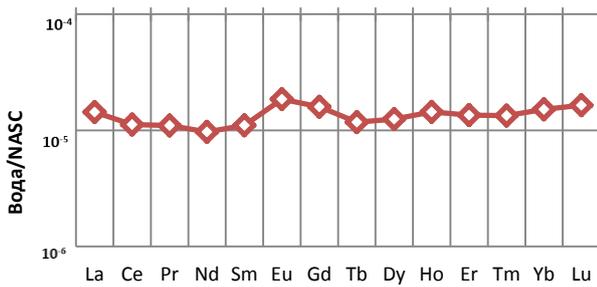
Кроме выше приведенных микроэлементов, в конденсационной влаге на отвалах вскрышных пород обнаружены значительные концентрации лантаноидов. Они также обладают токсичными свойствами и отрицательно влияют на здоровье человека [28–30]. В табл. 4 представлены содержания редкоземельных элементов.

**Таблица 4.** Содержания редкоземельных элементов в пробах конденсационной влаги, собранной на отвалах вскрышных пород, мкг/дм<sup>3</sup>

**Table 4.** Contents of rare earth elements in samples of condensation moisture collected from overburden dumps, mkg/dm<sup>3</sup>

Отвал/Dump	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1 (ER-3)	0,21	0,35	0,037	0,128	0,098	0,008	0,029	0,004	0,024	0,015	0,046	0,0022	0,015	0,0028
2 (ER-6)	0,46	0,82	0,087	0,32	0,063	0,023	0,083	0,01	0,065	0,0006	0,0018	0,0067	0,047	0,0079

Суммарное содержание лантаноидов в конденсационной влаге на отвале № 1 составляет 0,9272 мкг/дм<sup>3</sup>, на отвале № 2 – 2,0536 мкг/дм<sup>3</sup>.



**Рис. 11.** Распределение содержания редкоземельных элементов в пробе конденсационной влаги, собранной на отвале № 2 Ермаковского месторождения, нормированных по отношению к содержанию в NASC

**Fig. 11.** Distribution of the content of rare earth elements in a sample of condensation moisture collected at the dump no. 2 of the Ermakovskoe deposit, normalized in relation to the content in NASC

Из графика, представленного на рис. 11, видно, что в конденсационной влаге, собранной на отвале вскрышных пород, спектр характеризуется сравнительно равномерной конфигурацией распределения редкоземельных элементов. Четко проявляется европиевый максимум, наблюдается небольшое преобладание тяжелых лантаноидов над легкими, что, вероятно, связано с их распределением во вскрышных породах.

Данные о гранулометрическом и химическом составе твердых фаз пылеаэрозолей воздуха над Ермаковским бериллиевым месторождением получены путем исследования твердого остатка в снежном покрове. Твердый осадок был собран не во всех пробах в количестве, достаточном для определения необходимых параметров. Нами был проанализирован осадок в четырех пробах, отобранных в разных частях исследуемой территории.

Гистограммы распределения размеров частиц твердой фазы в снеге представлены на рис. 12. Концентрации химических элементов твердого остатка снегового покрова представлены в табл. 5.

Гранулометрический состав твердого остатка в пробах снега, отобранных в разных частях исследуемой территории, имеет существенные различия.

В непосредственной близости от отвалов вскрышных пород (пр. Е5) в снеге преобладают крупные частицы, а на удалении в гранулометрическом составе начинают играть ведущую роль фракции с более мелким размером частиц. В пробе Е8 количество частиц с размером 10–20 мкм составляет 10,56 %, а с размером 1–10 мкм – 29,29 %. В пробе Е10 частицы с размером 10–20 мкм составляют 19,47, а с размером 1–10 мкм – 8,2 %. В самой отдаленной точке наблюдения Е19 частицы размером 10–20 мкм составляют 9,19 %, а размером 1–10 мкм – 7,71 %. Таким образом, мелкая пыль удаляется от нарушенной техногенными процессами территории на расстояние в несколько километров. Наибольшую опасность для здоровья человека представляют мелкие частицы диаметром до 5 мкм. Мелкие частицы обладают способностью проникать глубоко в легкие, создавая тем самым высокий риск для здоровья, и они более токсичны по сравнению с более крупными частицами [31, 32]. Немаловажное значение на токсические свойства взвешенных частиц имеет и их химический состав, который приведен в табл. 5.

По отношению к кларковым содержаниям в твердой фазе снега отмечается существенное увеличение в составе твердого остатка таких элементов, как Be, Co, Cr, Cu, Zn и Pb. Высокие концентрации бериллия обнаружены в пробе Е8 (отвал № 1), в пробе Е5 (карьер) и в пробе Е18 (долина р. Кижинги). Установлены очень высокие содержания алюминия в твердой фазе снега, отобранного на значительном удалении от нарушенной территории (проба Е18), что указывает на интенсивный перенос ветром тонкой фракции продуктов разрушения эндогенных пород, которые могут быть представлены гиббситом, образующимся при химическом выветривании пород в кислой среде, или каолинитом. В целом химический состав твердой фазы снега указывает на то, что в воздушном переносе участвуют продукты разрушения рудной минерализации и околорудно измененных пород. Возможно, большая часть таких элементов, как хром, медь, цинк, свинец, находится в твердой фазе в сорбированном состоянии. При таянии снега они могут десорбироваться с твердой фазы, что приведет к попаданию в реку этих токсичных элементов. Вдыхание такой пыли, как было показано экспериментами на мышах, приводит к легочному воспалению и сосудистой дисфункции [33].

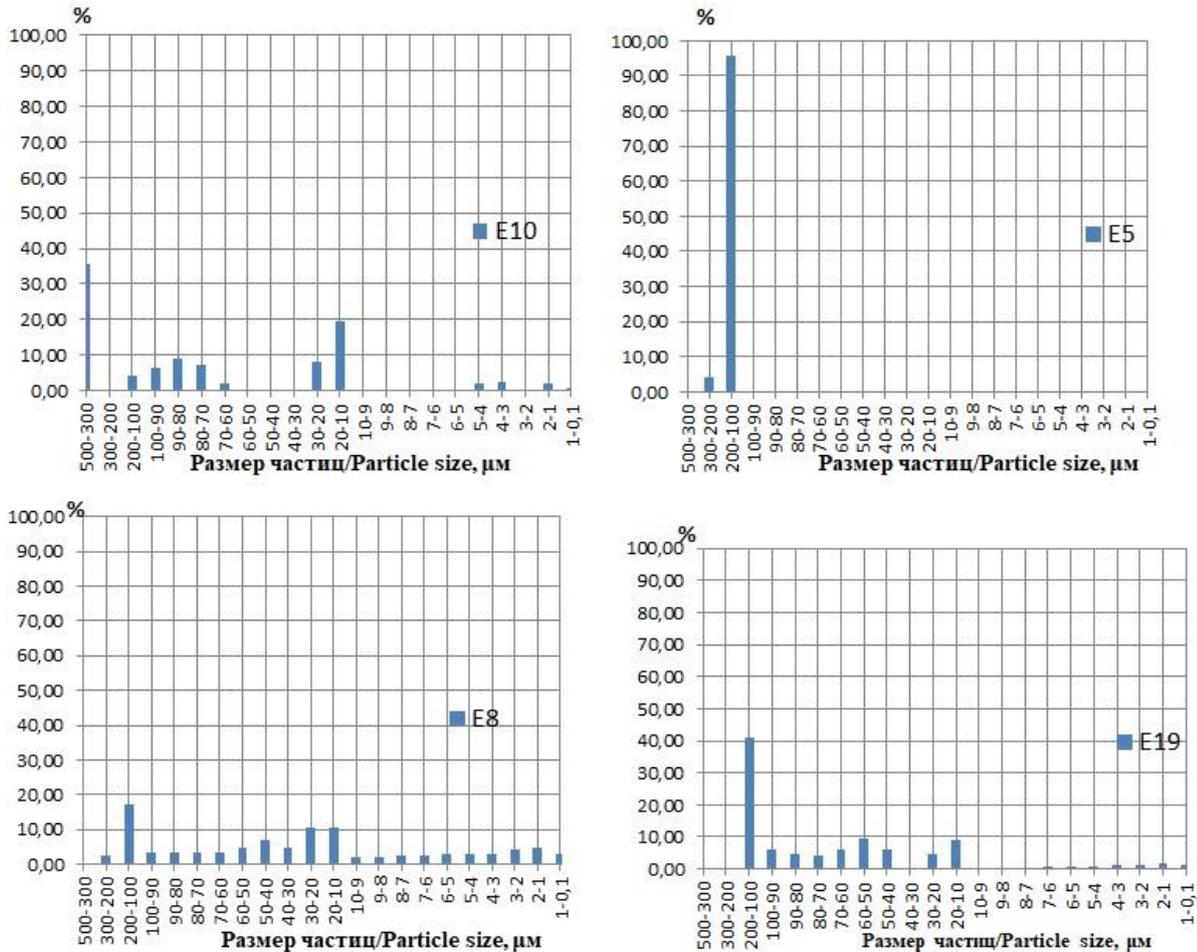


Рис. 12. Гранулометрический состав твердого остатка снегового покрова в точках опробования E5, E8, E10, E19  
 Fig. 12. Granulometric composition of the solid residue of the snow cover at sampling points E5, E8, E10, E19

Таблица 5. Химический состав твердого остатка снега, мг/кг

Table 5. Chemical composition of solid snow residue, mg/kg

Проба/Sample	Be	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cr	Cu	Zn	Pb
E5	4,6	36500	270	15400	7,1	49	110	70	190	17
E8	29	74100	1300	44400	31	44	65	71	320	25
E11	1,5	55900	410	19300	10	51	100	60	200	12
E18	3,0	83900	1500	45500	37	76	110	120	340	37
Среднее/Average	9,5	62600	870	31150	21	55	96	80	262	23
Кларк/Clarke*	3,8	80500	1000	46500	18	58	83	47	83	16

Примечание: Кларк – среднее содержание химического элемента в земной коре мг/кг, по [28].

Note: Clarke of chemical elements in the upper part of the continental crust mg/kg, according to [28].

Таким образом, проведенные исследования показывают, что снежный покров характеризует химический состав атмосферы и в целом экологические условия, сложившиеся на территории разработки бериллиевого фенакит-бертрандитового месторождения. Ранее считалось, что этот тип месторождений не наносит большого вреда окружающей территории, так как в их пределах не образуются кислые сточные воды. Проведенные исследования показали, что от отходов добычи формируется обширный ореол загрязнения воздуха аэрозолями токсичных хи-

мических элементов, который не только располагается над нарушенными горными работами участками, но и распространяется на окружающую территорию. Вероятно, на перенос веществ в атмосфере большое влияние оказывает рельеф местности. В зимний период происходит стекание холодного воздуха по долине рч. Зун-Шибирь и далее по долине р. Кижинги. В этом направлении от мест складирования вскрышных пород перемещается пыль, содержащая в своем составе бериллий, РЗЭ и другие токсичные элементы.

## Заключение

Природно-техногенная система, сформировавшаяся при разработке Ермаковского флюорит-берtrandит-фенакитового месторождения, несмотря на то, что уже прошло 34 года после прекращения всех работ по добыче руд, оказывает негативное влияние на экологическое состояние окружающей территории.

Экспериментальными исследованиями установлено, что над местами хранения отходов добычи этого месторождения формируются ореолы загрязнения воздушной среды. Их образование связано с испарением высокоминерализованных поровых вод, заключенных в отвалах вскрышных пород. В пробах конденсационной воды, собранной над вскрышными породами, установлены очень высокие содержания фосфора, алюминия, марганца, железа, цинка, меди, свинца, молибдена.

От нарушенных горными работами площадок на окружающую территорию рассеиваются жидкие и твердые аэрозоли, содержащие в своем составе высокотоксичные компоненты. В снежном покрове на территории разработки руд и на окружающей территории устанавливается кислая среда, pH талой воды составляет 5,73–6,39. Среди загрязняющих веществ в снежном покрове присутствуют высокотоксичные элементы, такие как бериллий, свинец, кадмий, молибден.

Особенности климатических условий благоприятствуют ветровому разносу жидких и твердых аэрозолей на большие расстояния и загрязнению обширных площадей. В твердом остатке снега на удалении 3 км от Ермаковского месторождения обнаружены как крупноразмерные, так и мелкодисперсные частицы, которые содержат в своем составе токсичные химические элементы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miler M., Bavec S., Gosar M. The environmental impact of historical Pb-Zn mining waste deposits in Slovenia // *Journal of Environmental Management*. – 2022. – Vol. 308. – P. 114580–114598. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114580.
2. Phytoremediation of Cu, Cd, Zn and As in four shrubs and trees growing on soil contaminated with mining waste / B. Heredia, R. Tapia, B.J. Young, P. Hasuoka, P. Pacheco, G. Roqueiro // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 308. – P. 136146. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136146.
3. Cooke C.A., Emmerton C.A., Drevnick P.E. Legacy coal mining impacts downstream ecosystems for decades in the Canadian Rockies // *Environmental Pollution*. – 2024. – Vol. 344. – P. 123328. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123328.
4. Evaluation and quantitative characterization for the ecological environment impact of open pit mining on vegetation destruction from landsat time series: a case study of Wulishan limestone mine / L. Ning, G. Yuhang, W. Liguan, W. Qizhou, Y. Dairong, Z. Shugang, L. Tao // *Ecological Indicators*. – 2024. – Vol. 158. – P. 111371. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111371.
5. ИТС 17-2021. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Размещение отходов производства и потребления. – М.: Изд-во Бюро НДТ, 2021. – 171 с.
6. Геохимия редкоземельных элементов в хвостах добычи и переработки вольфрамовых руд / А.М. Плюснин, В.В. Дабаева, Д.И. Жамбалова, Е.Г. Перязева, В.С. Ташлыков // *Геодинамика и минерагения северной и центральной Азии*. – Улан-Удэ: БГУ им. Доржи Бонзарова, 2018. – С. 297–299.
7. Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд / А.М. Плюснин, Ю.С. Воронина, А.В. Украинцев, М.К. Чернявский, Е.Г. Перязева, Е.П. Чебыкин // *Геохимия*. – 2023. – Т. 68. – № 12. – С. 1295–1311.
8. Soil-plant interactions and the uptake of Pb at abandoned mining sites in the Rookhope catchment of the N. Pennines, UK – a Pb isotope study / S.R. Chenery, M. Izquierdo, E. Marzouk, B. Klinck, B. Palumbo-Roe, A.M. Tye // *Science of The Total Environment*. – 2012. – Vol. 433. – P. 547–560. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.004.
9. Toxic effects of particulate matter derived from dust samples near the Dzhidinski ore processing mill, Eastern Siberia, Russia / K.E. Zychowski, A. Wheeler, B. Sanchez, M. Harmon, C.R. Tyler Steadman, G. Herbert, S.N. Lucas, A.M. Ali, S. Avasarala, N. Kunda, P. Robinson, P. Muttil, J.M. Cerrato, B. Bleske, O. Smirnova, M.J. Campen // *Cardiovascular Toxicology*. – 2019. – Vol. 19. – P. 401–411. DOI: 10.1007/s12012-019-09507-y.
10. Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Гальченко В.И. Ермаковское флюорит-бериллиевоe месторождение (Западное Забайкалье, Россия). – М.: ВИМС, 2009. – 308 с.
11. Куприянова И.И. Экологическая ситуация на территории Кижингинского карьера // *Разведка и охрана недр*. – 2008. – № 7. – С. 65–68.
12. Кислов Е.В., Иметхенов А.Б., Сандакова Д.М. Ермаковское флюорит-бериллиевоe месторождение: пути повышения экологической безопасности восстановления добычи // *География природы и ресурсы*. – 2010. – № 4. – С. 30–36.
13. Beryllium in the environment: a review / T.P. Tammy, M. Ding, D.S. Ehler, T.M. Foreman, J.P. Kaszuba, N.N. Sauer // *Journal of environmental science and health*. – 2003. – Vol. 38. – P. 439–469. DOI: 10.1081/ese-120016906.
14. Филов В.А. Бериллий и его соединения: окружающая среда, токсикология, гигиена // *Российский химический журнал*. – 2004. – № 2. – С. 76–86.
15. Smithwick R.W., Bowman D.H., Oatts T.J. Beryllium characterization in soils by selective extraction // *Talanta*. – 2021. – Vol. 223. – P. 121742. DOI: 10.1016/j.talanta.2020.121742.
16. Desorption and migration behavior of beryllium from contaminated soils: insights for risk-based management / Md.R. Islam, P. Sanderson, T.E. Payne, M.P. Johansen, R. Naidu // *Journal Acs Omega*. – 2021. – Vol. 6. – P. 30686–30697. DOI: 10.1021/acsomega.1c04572.
17. Плюснин А.М., Сандакова Д.М. Миграция токсичных элементов в пределах Ермаковского флюорит-берtrandит-фенакитового месторождения // *Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология*. – 2019. – № 4. – С. 49–56. DOI: 10.17308/geo.2019.4/2712.

18. An investigation of atmospheric mercury accumulated in the snow cover from the urbanized coastal zone of the Baltic Sea, Poland / P. Siudek, L. Falkowska, M. Frankowski, J. Siepak // *Atmospheric Environment*. – 2014. – Vol. 95. – P. 10–19. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.016.
19. Минералого-геохимическая характеристика снежного покрова в районах горнорудного производства / А.Ю. Опекунов, М.Г. Опекунова, С.Ю. Кукушкин, С.Ю. Янсон, И.Ю. Арестова, Н.А. Шейнерман, В.В. Спасский, Э.Э. Папаян, Е.Ю. Елсукова // *Геохимия*. – 2021. – Т. 66. – № 7. – С. 659–672.
20. Ревич Б.А., Сагит Ю.Е., Смирнова Р.С. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 17 с.
21. Василенко В.Н., Назаров И.Н., Фридман Ш.Б. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеониздат, 1985. – 182 с.
22. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам / Е.П. Чебыкин, Л.М. Сороковикова, И.В. Томберг, Е.Н. Воднева, С.В. Рассказов, Т.В. Ходжер, М.А. Грачёв // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2012. – Т. 20. – № 5. – С. 613–631.
23. Влияние химической пробоподготовки на определение высоких содержаний редкоземельных и высокозарядных элементов в геологических образцах методами ИСП-АЭС и ИСП-МС (на примере пород и руд месторождения «Томтор») / Б.Ю. Сарыг-оол, Л.Н. Букреева, И.Н. Мягкая, А.В. Толстов, Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик // *Журнал СФУ. Химия*. – 2020. – Т. 13. – № 4. – С. 593–605. DOI: 10.17516/1998-2836-0208.
24. Карбонаты и источники флюидов руд и метасоматитов Ермаковского флюорит-берtrandит-фенакитового месторождения (Западное Забайкалье) / Г.С. Рипп, И.А. Избродин, А.Г. Дорошкевич, М.О. Рампилов, Е.И. Ласточкин, В.Ф. Посохов // *Геология и геофизика*. – 2016. – Т. 57. – № 9. – С. 1641–1652. DOI: 10.15372/GiG20160904.
25. The “North American Shale Composite”: its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dymek, L.A. Haskin, R.L. Korotev // *Geochimica et cosmochimica Acta*. – 1984. – Vol. 48. – P. 2469–2482 DOI: 10.1016/0016-7037(84)90298-9.
26. Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Скоробогатова Н.В. Ермаковское флюорит-бериллиевое месторождение - уникальный минералогический памятник природы // *Разведка и охрана недр*. – 2006. – № 4. – С. 20–26.
27. Лыхин Д.А. Рудноносный магматизм Западно-Забайкальской бериллиевой провинции: возраст, состав, источники (на примере Ермаковского, Оротского, Ауниковского и Амандакского месторождений): автореф. дис. ... канд. наук. – М., 2011. – 31 с.
28. Редкоземельные элементы в подземных водах томского водозабора / В.К. Попов, Е.Ю. Пасечник, П.И. Проценко, О.Ю. Гончаров // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 97–105.
29. Batayneh A.T. Toxic (aluminum, beryllium, boron, chromium and zinc) in groundwater: health risk assessment // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2012. – Vol. 9 – P. 153–162. DOI: 10.1007/s13762-011-0009-3.
30. Toxicity of rare earth elements: an overview on human health impact / A.A. Brouziotis, A. Giarra, G. Libralato1, G. Pagano, M. Guida1, M. Trifuoggi // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – Vol. 10. – P. 948041. DOI: 10.3389/fenvs.2022.948041.
31. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. – 2015. – № 2. – С. 7–17.
32. Влияние твердых взвешенных частиц атмосферного воздуха населенных пунктов на здоровье человека / А.С. Холодов, К.Ю. Кириченко, К.С. Задорнов, К.С. Голохваст // *Вестник КамчатГТУ*. – 2019. – № 49. – С. 81–88.
33. Geršek M., Gosar M. Meltwater chemistry and characteristics of particulate matter deposited in snow as indicators of anthropogenic influences in an urban area // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2021. – Vol. 43. – P. 2583–2595. DOI: 10.1007/s10653-020-00609-z.

### Информация об авторах

**Алексей Максимович Плюснин**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии и геоэкологии, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а; [plyusnin@ginst.ru](mailto:plyusnin@ginst.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9380-7281>

**Елена Рафаиловна Гарипова**, аспирант Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а; [garipova1987@mail.ru](mailto:garipova1987@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0002-7377-9783>

**Александр Викторович Украинцев**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а; [ukraintsev87@bk.ru](mailto:ukraintsev87@bk.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6919-0736>

**Михаил Константинович Чернявский**, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а; [mitchel1977@mail.ru](mailto:mitchel1977@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1426-3998>

**Дашима Ивановна Жамбалова**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а; [dachima@mail.ru](mailto:dachima@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0230-6973>

Поступила в редакцию: 08.12.2023

Поступила после рецензирования: 19.02.2024

Принята к публикации: 01.10.2024

## REFERENCES

1. Miler M., Bavec S., Gosar M. The environmental impact of historical Pb-Zn mining waste deposits in Slovenia. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 308, pp. 114580. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114580.
2. Heredia B., Tapia R., Young B.J., Hasuoka P., Pacheco P., Roqueiro G. Phytoextraction of Cu, Cd, Zn and As in four shrubs and trees growing on soil contaminated with mining waste. *Chemosphere*, 2022, vol. 308, pp. 136146. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136146.
3. Cooke C.A., Emmerton C.A., Drevnick P.E. Legacy coal mining impacts downstream ecosystems for decades in the Canadian Rockies. *Environmental Pollution*, 2024, vol. 344, pp. 123328. DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123328.
4. Ning L., Yuhang G., Liguang W., Qizhou W., Dairong Y., Shugang Z., Tao L. Evaluation and quantitative characterization for the ecological environment impact of open pit mining on vegetation destruction from landsat time series: a case study of Wulishan limestone mine. *Ecological Indicators*, 2024, vol. 158, pp. 111371. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111371.
5. *ITS 17-2021. Information technology guide to the best available technologies. Disposal of production and consumption waste.* Moscow, NDT Bureau Publ. House, 2021. 171 p. (In Russ.)
6. Plyusnin A.M., Dabaeva V.V., Zhambalova D.I., Peryazeva E.G., Tashlikov V.S. Geochemistry of rare earth elements in tailings of mining and processing of tungsten ore. *Geodynamics and minerageny of northern and central Asia*. Ulan-Ude, Buryat State University named after Dorzhi Banzarov Publ., 2018. pp. 297–299. (In Russ.)
7. Plyusnin A.M., Voronina Yu.S., Ukrainsev A.V., Chernyavskii M.K., Peryazeva E.G., Chebykin E.P. Atmospheric pollution from a storage of tungsten–molybdenum ore mining and processing wastes. *Geochemistry*, 2023, vol. 61, no. 12, pp. 1293–1307. (In Russ.)
8. Chenery S.R., Izquierdo M., Marzouk E., Klinck B., Palumbo-Roe B., Tye A.M. Soil–plant interactions and the uptake of Pb at abandoned mining sites in the Rookhope catchment of the N. Pennines, UK – a Pb isotope study. *Science of The Total Environment*, 2012, vol. 433, pp. 547–560. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.004.
9. Zychowski K.E., Wheeler A., Sanchez B., Harmon M., Steadman Tyler C.R., Herbert G., Lucas S.N., Ali A.-M., Avsarala S., Kunda N., Robinson P., Muttill P., Cerrato J.M., Bleske B., Smirnova O., Campen M.J. Toxic effects of particulate matter derived from dust samples near the Dzhydinski ore processing mill, Eastern Siberia, Russia. *Cardiovascular Toxicology*, 2019, vol. 19, pp. 401–411. DOI: 10.1007/s12012-019-09507-y.
10. Kupriyanova I.I., Shpanov E.P., Galchenko V.I. *Ermakovskoe fluorite-beryllium deposit (Western Transbaikalia, Russia)*. Moscow, VIMS Publ., 2009. 308 p. (In Russ.)
11. Kupriyanova I.I. Ecological situation at the territory of Kizhinginsky quarry. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008. no. 7, pp. 65–68. (In Russ.)
12. Kislov E.V., Imetkhenov A.B., Sandakova D.M. Yermakovskoe fluorite-beryllium deposit: avenues for improving ecological security of revitalization of the mining operations. *Geography and natural resources*, 2010, no. 4, pp. 324–329. (In Russ.)
13. Tammy T.P., Ding M., Ehler D.S., Foreman T.M., Kaszuba J.P., Sauer N.N. Beryllium in the environment: a review. *Journal of environmental science and health*, 2003, vol. 38, pp. 439–469. DOI: 10.1081/ese-120016906.
14. Filov V.A. Beryllium and its compounds: environment, toxicology, hygiene. *Russian Chemical Journal*, 2004, no. 2, pp. 76–86. (In Russ.)
15. Smithwick R.W., Bowman D.H., Oatts T.J. Beryllium characterization in soils by selective extraction. *Talanta*, 2021, vol. 223, pp. 121742. DOI: 10.1016/j.talanta.2020.121742.
16. Islam Md.R., Sanderson P., Payne T.E., Johansen M.P., Naidu R. Desorption and migration behavior of beryllium from contaminated soils: insights for risk-based management. *Journal Acs Omega*, 2021, vol. 6, pp. 30686–30697. DOI: 10.1021/acsomega.1c04572.
17. Plyusnin A.M., Sandakova D.M. Migration of toxic elements within the Ermakovskoye fluorite-bertrandite-phenakite deposit. *VSU Bulletin. Series: Geography. Geocology*, 2019, no. 4, pp. 49–56. (In Russ.) DOI: 10.17308/geo.2019.4/2712.
18. Siudek P., Falkowska L., Frankowski M., Siepak J. An investigation of atmospheric mercury accumulated in the snow cover from the urbanized coastal zone of the Baltic Sea, Poland. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 95, pp. 10–19. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.016.
19. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G., Kukushkin S.Yu., Yanson S.Yu., Arestova I.Yu., Sheinerman N.A., Spasskii V.V., Elsukova E.Yu., Papyan E.E. Mineralogical-geochemical characteristics of the snow cover in areas with mining and ore-processing facilities. *Geochemistry*, 2021, vol. 66, no. 7, pp. 711–724. (In Russ.)
20. Revich B.A., Saet Yu.E., Smirnova R.S. *Methodological recommendations for assessing the degree of atmospheric air pollution in populated areas by metals based on their content in snow cover and soil*. Moscow, IMGRI Publ., 1990. 17 p. (In Russ.)
21. Vasilenko V.N., Nazarov I.N., Fridman S.B. *Monitoring of snow cover pollution*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 182 p. (In Russ.)
22. Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. Modern state of water in the Selenga river at the territory of Russia over major components and trace elements. *Chemistry for sustainable development*, 2012, vol. 20, no. 5, pp. 613–631.
23. Saryg-ool B.O.Yu., Bukreeva I.N., Myagkaya I.N., Tolstov A.V., Lazareva E.V., Zhmodik S.M. Influence of sample pretreatment on the analysis of high contents of rare-earth and high field strength elements in geological samples by ICP-AES and ICP-MS (case study of the Tomtor Deposit). *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 593–605. (In Russ.) DOI: 10.17516/1998-2836-0208.
24. Ripp G.S., Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Rampilov M.O., Lastochkin E.I., Posokhov V.F. Carbonates and sources of fluids in ores and metasomatites of the Ermakovka fluorite-bertrandite-phenakite deposit (western Transbaikalia). *Russian geology and geophysics*, 2016, vol. 57, no. 9, pp. 1641–1652. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG20160904.
25. Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The “North American Shale Composite”: its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 2469–2482. DOI: 10.1016/0016-7037(84)90298-9.

26. Kupriyanova I.I., Shpanov E.P., Skorobogatova N.V. Ermakovskoe fluorite-beryllium deposit is a unique mineralogical natural monument. *Exploration and protection of subsoil*, 2006, no. 4, pp. 20–26. (In Russ.)
27. Lykhin D.A. *Ore-bearing magmatism of the Western Transbaikalian beryllium province: age, composition, sources (on the example of the Ermakovsky, Orotsky, Auniksky and Amandaksky deposits)*. Cand. Diss. Abstract. Moscow, 2011. 31 p. (In Russ.)
28. Popov V.K., Pasechnik E.Yu., Protsenko P.I., Goncharov O.Yu. Rare earth element content in groundwater of Tomsk water intake. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 97–105. (In Russ.)
29. Batayneh A.T. Toxic (aluminum, beryllium, boron, chromium and zinc) in groundwater: health risk assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2012, vol. 9, pp. 153–162. DOI: 10.1007/s13762-011-0009-3.
30. Brouziotis A.A., Giarra A., Libralato G., Pagano G., Guida M., Trifuoggi M. Toxicity of rare earth elements: An overview on human health impact. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, vol. 10, pp. 948041. DOI: 10.3389/fenvs.2022.948041.
31. Kasimov N.S. Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry. *Bulletin of Moscow University. Episode 5. Geography*, 2015, no. 2, pp. 7–17. (In Russ.)
32. Kholodov A.S., Kirichenko K.Y., Zadornov K.S., Golokhvast K.S. Effect of particulate matter in the air of residential areas on human health. *Bulletin of KamchatSTU*, 2019, no. 49, pp. 81–88. (In Russ.)
33. Geršek M., Gosar M. Meltwater chemistry and characteristics of particulate matter deposited in snow as indicators of anthropogenic influences in an urban area. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, vol. 43, pp. 2583–2595. DOI: 10.1007/s10653-020-00609-z.

### Information about the authors

**Alexey M. Plyusnin**, Dr. Sc., Head of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology, N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation; [plyusnin@ginst.ru](mailto:plyusnin@ginst.ru); <https://orcid.org/0000-0001-9380-7281>

**Elena R. Garipova**, Postgraduate Student, N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation; [garipova1987@mail.ru](mailto:garipova1987@mail.ru); <https://orcid.org/0009-0002-7377-9783>

**Alexander V. Ukraintsev**, Cand. Sc., Scientific Researcher, N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation; [ukraintsev87@bk.ru](mailto:ukraintsev87@bk.ru); <https://orcid.org/0000-0001-6919-0736>

**Mikhail K. Chernyavskii**, Cand. Sc., Scientific Researcher, N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation; [mitchel1977@mail.ru](mailto:mitchel1977@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-1426-3998>

**Dashima I. Zhambalova**, Cand. Sc., Scientific Researcher, N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a, Sakhyanova street, Ulan-Ude, 670047, Russian Federation; [dachima@mail.ru](mailto:dachima@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-0230-6973>

Received: 08.12.2023

Revised: 19.02.2024

Accepted: 01.10.2024