

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 550.43

doi: 10.17223/25421379/37/12

ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ТВЕРДОГО ОСАДКА СНЕГА НА ТЕРРИТОРИИ ДЖИДИНСКОГО ВОЛЬФРАМО-МОЛИБДЕНОВОГО КОМБИНАТА



Юлия Сергеевна Воронина¹, Алексей Максимович Плюснин²,
Ольга Николаевна Чудинова³

^{1,3} Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

² Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия

¹ u_voronina96@mail.ru

² plusnin-53@mail.ru

³ chudinova1980@inbox.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования снежного покрова на территории, испытывающей влияние отходов разработки месторождений вольфрама и молибдена. Несмотря на то, что горнодобывающее предприятие прекратило свою деятельность более 25 лет назад, отходы производства все еще оказывают негативное воздействие на состояние природной среды. Рассмотрен перенос в воздушной среде токсичных химических элементов в составе твердой фазы. Показано, что основными источниками загрязнения воздушной среды являются места хранения отходов добычи и переработки руд. Рассмотрены механизмы формирования ореолов загрязнения снежного покрова, представлены моноэлементные карты рассеяния токсичных элементов в составе пыли. На основании исследования минерального состава пыли показано, что пылевая нагрузка на снежный покров формируется за счет местных очагов загрязнения.

Ключевые слова: горнодобывающее производство, загрязнение, воздух, снежный покров, твердый осадок, тяжелые металлы

Источник финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-20077).

Для цитирования: Воронина Ю.С., Плюснин А.М., Чудинова О.Н. Химический и минеральный состав твердого осадка снега на территории Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // Геосферные исследования. 2025. № 4. С. 173–186. doi: 10.17223/25421379/37/12

Original article

doi: 10.17223/25421379/37/12

CHEMICAL AND MINERAL COMPOSITION OF SOLID SNOW SEDIMENT ON THE TERRITORY OF THE DZHIDA TUNGSTEN-MOLYBDENUM COMBINE

Yulia S. Voronina¹, Alexey M. Plusnin², Olga N. Chudinova³

^{1,3} East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

² N.L. Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

¹ u_voronina96@mail.ru

² plusnin-53@mail.ru

³ chudinova1980@inbox.ru

Abstract. For many years, the study area has been developing tungsten and molybdenum deposits, which was accompanied by changes in landscapes, pollution of water and soil resources, and atmospheric air. After the closure of the enterprise, the negative impact on the state of the natural environment has not ceased for more than 25 years.

The article presents the results of a study of the chemical and mineral composition of solid sediment of the snow cover in the technogenically disturbed area of the Dzhida tungsten-molybdenum plant. 22 snow samples were collected. The snow melted at room temperature, the suspension was separated by decantation, dried, and weighed. The study of the solid phase of the snow cover was carried out using modern analysis methods. The chemical composition of the solid sediment was determined by atomic emis-

sion spectrometry with inductively coupled plasma on an iCAP Pro XP Duo device (Termo Fisher Scientific). The mineral composition of dispersed particles of the snow cover was studied using electron microscopy images and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX elemental analysis) using a JEM-2010 electron microscope with an EDAX PHOENIX microanalysis system. The solid phase content in the snow cover varies widely, from 0,1982 g to 5,8182 g was collected from the surface of 25 dm². 456 analysis were made in the chemical composition of the solid phase of snow, a group of elements representing high toxicity and characterized by high concentrations was identified. High concentrations of manganese, aluminum, lead, copper, zinc, iron, and cadmium were found in the solid phase. Their contents were compared with concentrations in urban soils, and it was found that there was a significant excess of the average contents established for cities. The highest concentrations are: manganese, which is 27 times higher than the average content established for cities, iron – 15 times, aluminum – 15 times. Such sharp differences from the content in urban soils are associated with the impact of mining.

To demonstrate the spatial distribution of chemical elements, the interpolation of concentration values obtained at sampling points onto the surrounding area was carried out using the kriging method in the ArcGIS GIS package. Single-element maps of the distribution of toxic element contents in the territory of the natural-technogenic system of the Far Eastern Metallurgical Plant and the city of Zakamensk were constructed, and the mechanism for the formation of halos was substantiated. It was concluded that the formation of contrasting anomalies of snow cover pollution with suspended matter is facilitated by the grinding of rocks in the technological process and the acidification of surface and groundwater.

Solid snow sediment is mainly represented by amorphous particles of rock and ore weathering products, among which individual grains of mineral phases stand out. In the territory of the city of Zakamensk and in the valley of the Dzhida River, the mineral composition of the solid snow residue is represented by the products of physical and chemical weathering of rocks. Here, weathering-resistant quartz, magnetite, biotite, and ilmenite are determined. In places where industrial waste is located, products of ore weathering, acidic destruction of rocks, and residual ore minerals are found. Based on the study of the mineral composition of the solid sediment isolated from the snow cover, it can be argued that the dust composition of the snow is formed due to the spread of loose formations directly adjacent to the sampling site.

As a result of the studies, the main centers of dust pollution of the territory were determined, which confirms the high environmental hazard of the Dzhida tungsten-molybdenum plant waste.

Keywords: *mining, pollution, air, snow cover, solid sediment, heavy metals*

Source of financing: the study was supported by the Russian Science Foundation (project № 24-27-20077).

For citation: Voronina Yu.S., Plyusnin A.M., Chudinova O.N. (2025) Chemical and mineral composition of solid snow sediment on the territory of the Dzhida Tungsten-Molybdenum Combine. *Geospfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 173–186. doi: 10.17223/25421379/37/12

Введение

Изучение воздействия отходов добычи и переработки руд на окружающую среду на сегодняшний день является актуальной задачей. Существуют различные методы оценки качества среды в местах сосредоточения отходов деятельности горнопромышленных предприятий, например, метод биоиндикации, снегохимические съемки и др. [Мынбаева, Есиркепова, 2011; Смирнова, Плюснин, 2014; Осипова, 2023].

Снежный покров является природным сорбентом атмосферных пылевых частиц и индикатором экологического состояния воздушных масс в исследуемом районе [Будаева, 2021; Володина, Таловская, 2022]. Снег выступает эффективным накопителем токсичных веществ, которые сохраняются в нем в неизменном состоянии в течение зимы. Химический состав снега отражает величину сухих и влажных выпадений и служит количественной характеристикой загрязнения территорий. Чувствительность снежного покрова к смене индустриальной обстановки позволяет объективно оценивать состояние окружающей среды [Василевич, 2011].

Загрязняющие вещества в снежный покров попадают из двух агрегатных состояний: водорастворимые формы переходят в талую воду, пыль становится

частью твердого осадка, накопленного в снеге [Чередова, Дорошкевич, 2022].

Целью данного исследования является изучение химического и минерального состава твердого осадка снега на территории природно-техногенной системы ДВМК и г. Закаменска.

Объекты и методы исследования

Район исследования располагается в юго-западной части Республики Бурятия на границе с Монголией. С 1937 по 1997 г. на этой территории функционировал ДВМК – первое предприятие горнодобывающей промышленности в Республике Бурятия, которое давало стране в разные годы от 50 до 100 % добываемого вольфрама. За время работы предприятия было сформировано более 40 млн т отходов переработки руд, которые в настоящее время представляют наибольшую опасность для населения и окружающей среды г. Закаменска, а также для бассейна озера Байкал, поскольку район исследования относится к буферной экологической зоне Байкальской природной территории (Федеральный Закон № 94 «Об охране озера Байкал»). Наибольший вклад в загрязнение снежного покрова территории вносят отходы переработки, находящиеся в виде песков, складированных в

Барун- и Зун-Нарынских хвостохранилищах; отходы добычи, представленные крупноглыбовым материалом вскрышных пород, расположенных возле двух карьеров. Из-под отвалов вскрышных пород вытекает незамерзающий ручей, который впадает в р. Мыргеншено. Из разведочной штольни, которая расположена в долине р. Модонкуль, круглый год изливаются рудничные воды. Из других источников негативного воздействия на окружающую среду необходимо указать центральную котельную города, городские очистные сооружения и предприятие ООО «Литейщик». На исследуемой территории функционирует АО «Закаменск», которое занимается вторичной переработкой хвостов обогащения ДВМК. Конечным продуктом

является концентрат вольфрамовый гюбнеритовый флотационный первого сорта (ГОСТ 213-83). Производительность предприятия 1 млн т переработки песков в год.

Для исследования химического и минерального состава снежного покрова были выбраны участки в г. Закаменске и прилегающей техногенно-измененной территории. Отбор проб снега проводился в 2021, 2022 и 2023 гг. Профили опробования (рис. 1) располагались в границах селитебной зоны, техногенных объектов, хранилищ отходов переработки руд, вскрышных пород. Всего было отобрано 22 пробы снега. Химический состав твердого осадка был определен в семи точках опробования, минеральный состав – в шести точках.

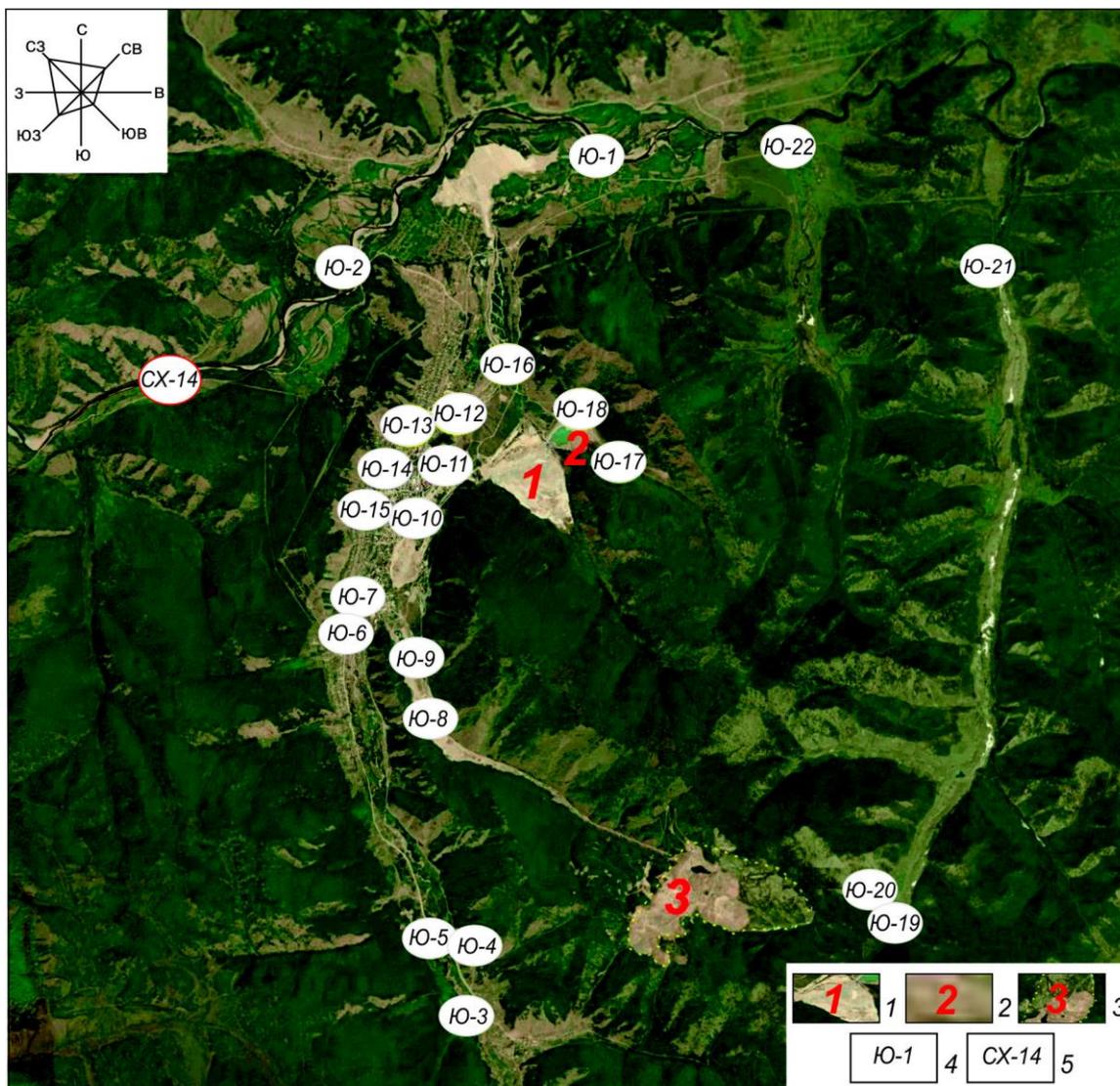


Рис. 1. Схема опробования снежного покрова

1 – Барун-Нарынское хвостохранилище; 2 – Зун-Нарынское хвостохранилище; 3 – хранилище отходов добычи вольфрамо-молибденовых руд; 4 – место опробования снежного покрова; 5 – место отбора фоновой пробы снега

Fig. 1. Snow cover sampling scheme

1 – Barun-Naryn tailings storage facility; 2 – Zun-Naryn tailings storage facility; 3 – storage facility for waste from tungsten-molybdenum ore mining; 4 – snow cover sampling site; 5 – background snow sample collection site

Для отбора пробы снега на его поверхности располагалась картонная рамка размером 5,0×5,0 дм (S = 25 дм²). Снег отбирался внутри рамки на всю его мощность. Отбор производился пластиковым совком, исключая слой, соприкасающийся с почвой. Ширина рамки позволяла свободно отобрать пробы в углах рамки. Вся масса снега собиралась в полиэтиленовый пакет. Таяние снега производилось при комнатной температуре. Вода сливалась в стеклянную посуду, процеживалась через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм для определения микроэлементного состава методом ICP-MS. Для подготовки к определению макрокомпонентного состава талая вода процеживалась с помощью воронки Бюхнера и колбы Бунзена через фильтр «синяя лента» за счет разности давления, создаваемой водоструйным вакуум-насосом [Плюснин и др., 2023].

Твердый осадок отделялся от воды методом декантации, высушивался, взвешивался. Химический состав твердого осадка определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на приборе iCAP Pro XP Duo (Termo Fisher Scientific, США). Минеральный состав дисперсных частиц снежного покрова был изучен по снимкам электронной микроскопии и результатам энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX-элементного анализа) с помощью электронного микроскопа JEM-2010 с системой микроанализа EDAX PHOENIX.

Обработка исходных данных была произведена с применением программного пакета Microsoft Office Excel 2013, Statistica. Обработка графического материала осуществлялась с помощью программ Corel Draw и Adobe Photoshop. Карты распределения химических элементов в пыли созданы с помощью программного обеспечения ArcGIS.

Результаты и обсуждение

В талой воде pH изменяется от 5,4 до 7,4, общая минерализация составляет в среднем 148 мг/л. Согласно формуле Курлова, талые воды относятся к пресным гидрокарбонатно-сульфатным натриево-кальциево-магниевым. Установлена корреляционная зависимость между общей минерализацией и содержаниями сульфат-иона. Среди микроэлементов аномально высокими концентрациями выделяется алюминий – 14 600 мкг/л. Наблюдается значительная дисперсия в его концентрации, которая достигает трех математических порядков. В снежном покрове зафиксированы также высокие содержания железа (1500 мкг/л), марганца (2200 мкг/л), кремния (1280 мкг/л), цинка (1260 мкг/л), меди (95 мкг/л), никеля (87 мкг/л), фосфора (220 мкг/л). Концентрация микроэлементов на исследуемой территории по сравнению с фоновой точкой показывает превышение от 1,5 до 262 раз (табл. 1).

Таблица 1
Химические элементы в составе талой воды в районе г. Закаменска и окружающей территории, мкг/л

Table 1
Chemical elements in the composition of meltwater in the area of Zakamensk and the surrounding area, mcg/l

Показатель	Al	Fe	Mn	Si	Zn	Cu	Ni	P
Концентрация химического элемента на исследуемой территории	$\frac{11,5-14600}{1971}$	$\frac{13,4-76}{31}$	$\frac{16,6-2200}{247}$	$\frac{27-1280}{214}$	$\frac{9,5-1260}{207}$	$\frac{1,71-95}{14}$	$\frac{0,82-87}{8,5}$	$\frac{16-220}{80}$
р. Джиды	13	21	10,3	–	23	19	8,7	26
Фон (СХ-14)	7,5	18,3	6,7	20	9,3	0,58	0,57	21

Примечание. В числителе указаны минимальные и максимальные значения концентраций, в знаменателе – среднее значение по 22 пробам.

Note. The numerator indicates the minimum and maximum concentrations, and the denominator indicates the average value for 22 samples.

Кластерный анализ микроэлементного состава талой воды по площади опробования позволил выделить шесть мест, различающихся по условиям формирования химического состава. Наиболее значимой связью выделяются пробы снега, химический состав которого находится под воздействием незамерзающих водотоков рек и ручьев Мыргеншено, Модонкуль, Зун-Нарын (Ю-17, Ю-18, Ю-20, Ю-22).

Эти водотоки испытывают воздействие разгрузки штольневых, подотвальных вод. Вторая группа состоит из проб снега, отобранных в восточной части г. Закаменска и в п. Холтосон (Ю-10, Ю-11, Ю-7, Ю-3). Эти пробы испытывают воздействие за счет рассеивания пыли от мест складирования вскрышных пород и территории нарушенной горными работами.

Третья группа проб отобрана в западной части г. Закаменска, снежный покров которой подвергается воздействию выбросов автомобильного транспорта, систем центрального и частного отопления жилья. Четвертая группа проб отобрана на удалении от источников загрязнения в долине рек Джиды и Модонкуль, характеризуется воздействием интенсивных ветров (Ю-2, Ю-5). Пятая группа проб отобрана на рекультивированной и засеянной травянистой растительностью территории (Ю-14, Ю-16, Ю-13, Ю-21). Шестая группа проб отобрана в долине руч. Инкур, в районе старой обогатительной фабрики, куда завезена почва и высажена древесная растительность.

Каждая группа проб характеризуется своей ассоциацией химических элементов и различается их концентрацией (рис. 2). Подробный анализ поведения микроэлементов в талой воде приведен в публикации [Плюснин и др., 2023]. Пылевое загрязнение техногенных территорий в настоящее время широко обсуждается: проводятся комплексные оценки состояния техногенно-нарушенных территорий, рассматривается интенсивность и динамика пылевого загрязнения, изучаются отдельные компоненты химического

состава пыли [Просекин, 2023; Кирина, 2023, Осипова, 2024].

Содержание пыли в снежном покрове изменяется в широких пределах, с поверхности 25 дм² было собрано от 0,1982 до 5,8182 г. В твердом осадке снега произведено 456 элементоопределений, выделена группа элементов, представляющая высокую токсичность. Высокими содержаниями характеризуются марганец, алюминий, свинец, цинк, железо, медь, кадмий.

В табл. 2 концентрация химических элементов в твердой фазе снежного покрова приведена в сравнении со средними содержаниями, установленными для городов с населением менее 100 тыс. чел. [Алексеевко, 2017]. К этой категории городов относится г. Закаменск.

Концентрация всех рассмотренных элементов значительно превышает средние содержания, установленные для городов. Среди химических элементов выделяются: марганец – выше средних содержаний, установленных для городов, в 27 раз, железо – в 15 раз, алюминий в 15 раз. Такие резкие отличия от содержания в почвах городов, несомненно, связаны с воздействием горнодобывающего производства.

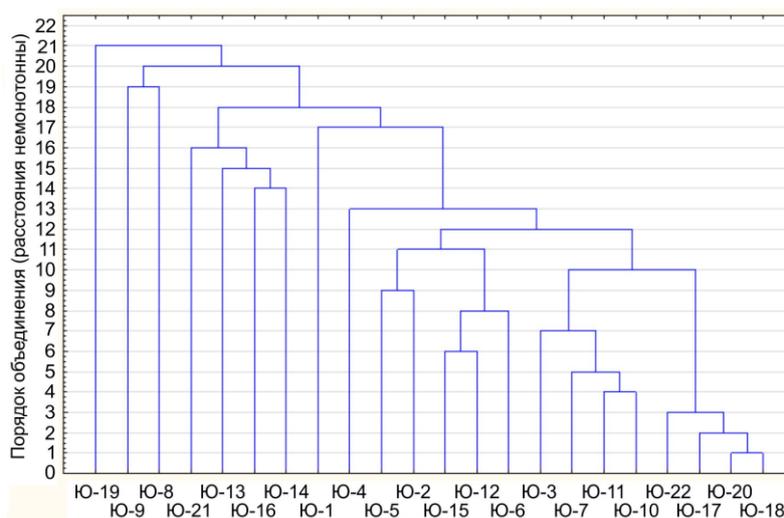


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа места расположения проб снега

Fig. 2. Dendrogram of cluster analysis of snow sample locations

Пределы изменения и средние содержания химических элементов в твердой фазе снега в сравнении со средними содержаниями в почвах населенных пунктов, мг/кг

Таблица 2

Limits of change and average contents of chemical elements in the solid phase of snow in comparison with the average contents in the soils of settlements, mg/kg

Table 2

Элемент	Al	Zn	Pb	Fe	Mn	Cu	Cd
Диапазон изменения	38 400–86 600	230–720	16–315	29 800–52 000	740–2 200	54–2 200	1,9–10
Средняя концентрация	66 980	404	85,9	39 730	1 252	417,7	4,79
Среднее для городов с населением менее 100 тыс. чел.	4 484	9,24	3,95	2657	45,75	2,82	0,14

Для демонстрации пространственного распределения химических элементов проведена интерполяция значений концентраций, полученных в точках отбора проб, на окружающую территорию. Данная процедура осуществлена с помощью метода кригинга в ГИС-пакете ArcGIS. На основании обработки результатов анализа химических элементов в твердом осадке снежного покрова были составлены моноэлементные карты распределения содержания загрязняющих веществ по исследованной территории, которые представлены на рис. 3–5. Рассмотрим закономерности распределения концентрации на исследуемой территории и возможные механизмы поступления некоторых химических элементов в твердую фазу снежного покрова.

Алюминий. Алюминий входит в состав вмещающих оруденение алюмосиликатных горных пород. Этот элемент считается малоподвижным в естественных условиях. Высокая миграционная способность алюминия на исследуемой территории, по нашему мнению, связана с тем, что в кислых условиях происходит интенсификация разложения полевых шпатов и алюминий выделяется в раствор в форме трехвалентного катиона. В присутствии сульфат-иона образуются комплексные соединения, в результате гидролиза может образоваться тонкая взвесь гиббсита. Тонкая взвесь, содержащая алюминий, осаждается на почвенном покрове, аллювиальных отложениях рек, по берегам рек и может вовлекаться в миграцию воздушными потоками. Выделяются два центра загрязнения снежного покрова алюминием (рис. 3). Наиболее сильно снег загрязнен в юго-восточной части территории. Концентрация достигает 86 600 мг/кг.

Этот ареол загрязнения связан со складированными отходами добычи руд. Здесь размещены вскрышные породы двух карьеров. Породы интенсивно раздроблены при проведении горных работ. Складирование производилось путем ссыпания пород самосвалами на крутой склон распадка. Куски породы под действием гравитации перемещались вниз по склону, в результате сформировалась осыпь мощностью в несколько десятков метров. В толще осыпи конденсируется влага, проникают атмосферные осадки, происходит окисление сульфидной минерализации, протекает химическое выветривание пород.

Второй ареол загрязнения выделяется в западной части территории, в долине р. Модонкуль и руч. Инкур. Эти водные объекты находятся под воздействием изливающихся высоко минерализованных вод из штолен «Западная» и «Северная». Излив рудничных вод происходит круглый год. Здесь в твердом осадке снежного покрова установлена концентрация алюминия, достигающая 76 000 мг/кг. Вероятно, из штолен выносятся твердые продукты выветривания пород, которые развеваются ветром.

Железо. Наиболее высокая концентрация железа сосредоточена в точках, расположенных в черте г. Закаменска (Ю-13, Ю-6) (рис. 3). Повышенная концентрация отмечена в долине р. Модонкуль. Вероятно, это связано с наличием действующих промышленных предприятий города, упомянутых ранее, а также с наличием большого количества продуктов рудной минерализации, в частности пирита и сидерита в песках, рассеянных на этой площади в период работы обогатительной фабрики. Вероятно, на этой территории протекает реакция окисления сульфидов кислородом воздуха и разложение сидерита.

В загрязнение снежного покрова железом существенный вклад вносит также изливающаяся вода из штольни «Западная», устье которой находится в долине р. Модонкуль. Содержание железа в рудничных водах достигает значений 17,67 мг/л [Смирнова, Плюснин, 2013].

Основная масса железа в рудничных водах находится в степени окисления +2. При изливании вод на поверхность происходит окисление железа до степени окисления +3. Происходит гидролиз этой формы железа, в результате чего вода еще больше закисляется, что фиксируется уменьшением pH на удалении 50–100 м от штольни. Образующиеся гидроокислы железа первоначально переносятся в коллоидном состоянии. Затем происходит их осаждение в виде тонкой взвеси на берегах реки. Тонкая взвесь может разноситься воздушными массами по долине.

Марганец. Высокая концентрация марганца в потоках твердых аэрозолей связана с тем, что для вольфрамовых месторождений характерно присутствие этого элемента в виде минерала родохрозит, который встречается в виде жил. В составе отходов переработки руд родохрозит попадает в хвостохранилище. В кислой среде хвостохранилищ происходит разложение этого минерала, и марганец переходит в раствор в форме двухвалентного иона, в растворе он может образовывать комплексные соединения с сульфат-ионом, гидролизироваться и выпадать в виде гидроксида.

Наиболее высокие содержания марганца в снежном покрове сосредоточены в местах складирования отходов горнодобывающего производства. Аномальными содержаниями выделяются верховье р. Мыргеншено, долины руч. Инкур, Зун-Нарын. Наиболее высокие концентрации установлены в западной части рассматриваемой территории, в долине р. Модонкуль, в том числе на территории г. Закаменска (рис. 4). Эта аномалия, вероятно, как и аномалия железа, связана с изливом рудничных вод из штольни «Западная». Летом 2019 г. вода в реке окрасилась в оранжевый цвет из-за залпового выброса штольневых вод. В составе взвешенных веществ были установлены гидроксиды железа и марганца. Отложившаяся на берегах взвесь до сих пор является источником загрязнения снега.

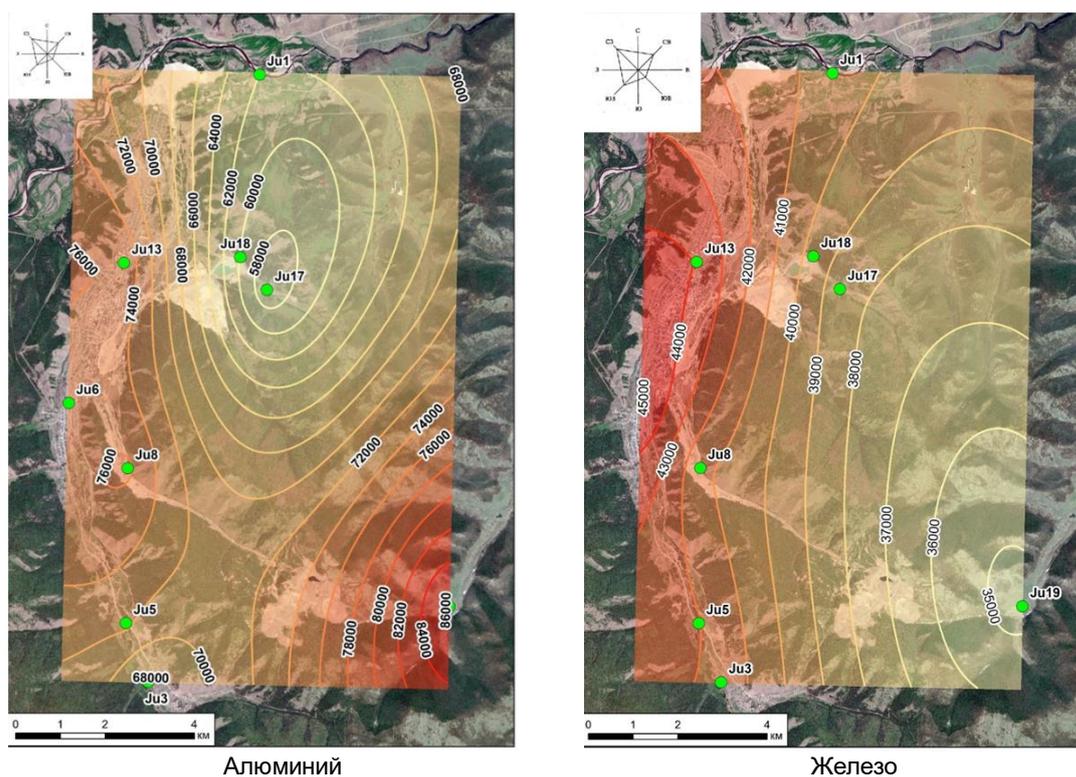


Рис. 3. Карты распределения алюминия и железа в твердом осадке снежного покрова, мг/кг

Fig. 3. Maps of the distribution of aluminum and iron in the solid sediment of the snow cover, mg/kg

Цинк. Цинк является одним из наиболее подвижных элементов в системе «вода – порода». Это связано с малой устойчивостью сфалерита в окислительных условиях. Существуют несколько компонентов, которые ограничивают накопление цинка в природных водах. Важнейшим является карбонат-ион, при взаимодействии с которым образуется смитсонит. Цинк может высаживаться из раствора при взаимодействии с фосфат-ионом [Бычков, 2015].

Максимальные концентрации цинка зафиксированы в местах складирования вскрышных пород в долине р. Мыргеншено, где, как указывалось ранее, происходит интенсивное разложение сульфидной минерализации (рис. 4). Высокие содержания цинка в твердом остатке снежного покрова установлены в долине р. Модонкуль и руч. Инкур, находящихся под воздействием рудной минерализации. В жилой зоне г. Закаменска высокое содержание цинка может быть обусловлено наличием промышленных объектов в жилом массиве, например ООО «Литейщик», в выбросах которого содержится оксид цинка.

Медь. Медь чрезвычайно подвижна в водных растворах. Считается, что медь является одним из наиболее подвижных элементов в зоне гипергенеза [Бычков, 2015]. В месторождениях Джидинского рудного узла медь присутствует в виде халькопирита. Эксперимен-

тальное исследование окисления этого минерала показало, что медь из раствора может высаживаться в виде гидроксида [Плоснин, Гунин, 2001]. Затем со временем происходит образование малахита и азурита.

Самые высокие концентрации меди в твердом остатке снега установлены в районе верховьев р. Мыргеншено (рис. 5). Здесь интенсивно окисляются сульфидные минералы, присутствующие в вскрышных породах.

Свинец. Свинец довольно хорошо мигрирует в природных водах, осаждаясь на сорбционном барьере на глинах и особенно на органическом веществе [Бычков, 2015]. При выветривании рудных месторождений образуется плохо растворимый сульфат свинца (англезит). Рассеяние свинца по исследуемой территории отличается от рассмотренных выше элементов. Наиболее высокие концентрации сосредоточены к юго-востоку от района расположения хвостохранилищ Барун-Нарын и Зун-Нарын. Предполагается, что это может быть связано с работой производственной техники предприятия АО «Закаменск». В жилом массиве г. Закаменска концентрации на порядок ниже, ореол от города смещается на юго-восток (рис. 5). В средней части долины р. Модонкуль ореол свинца в снежном покрове может быть связан с рассеиванием твердых осадков, накопившихся возле устья штольни «Западная».

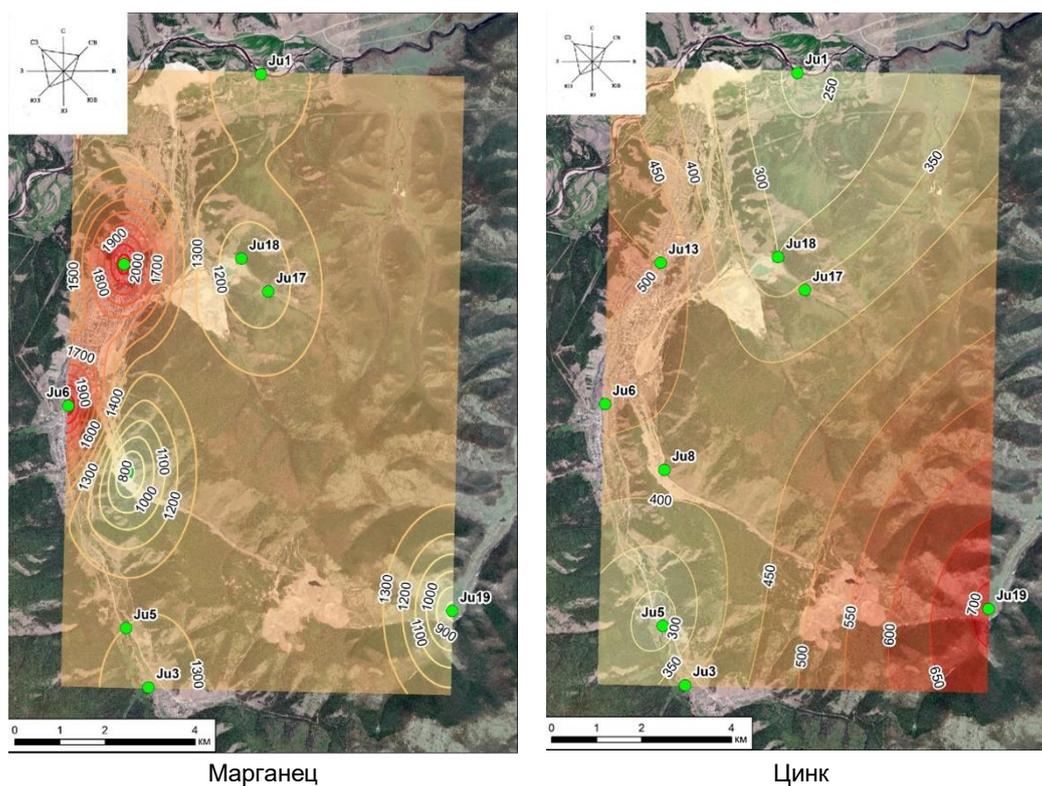


Рис. 4. Карты распределения марганца и цинка в твердом осадке снежного покрова, мг/кг

Fig. 4. Maps of the distribution of manganese and zinc in the solid sediment of the snow cover, mg/kg

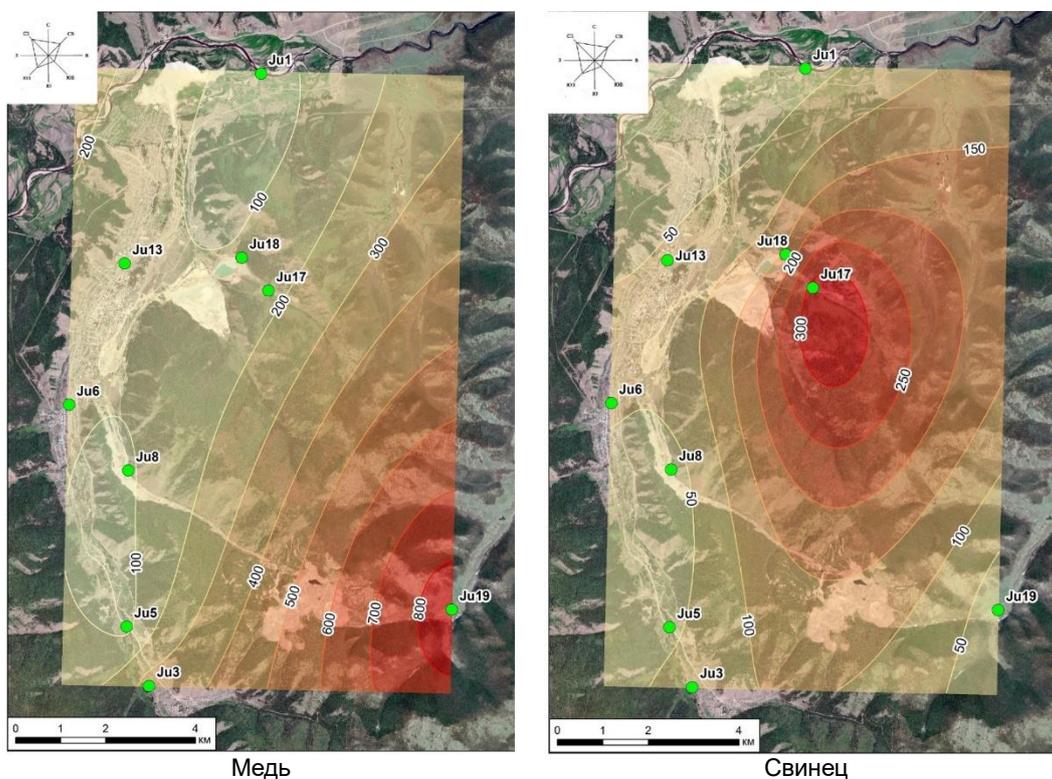


Рис. 5. Карты распределения меди и свинца в твердом осадке снежного покрова, мг/кг

Fig. 5. Maps of the distribution of copper and lead in the solid sediment of the snow cover, mg/kg

Кадмий. Кадмий является высокотоксичным элементом, который имеет отчетливую тенденцию к накоплению в организме: период его полувыведения составляет 10–35 лет [Бычков, 2015]. Кадмий является геохимическим аналогом цинка. В магматическом процессе кадмий так же, как и цинк, рассеивается среди темноцветных минералов: пироксены, амфиболы, слюды, магнетит содержат сотни мг/т кадмия. Это на порядок больше, чем в плагиоклазе. Кадмий, как и цинк присутствует в породах вместе с железом и магнием. Кадмий обладает достаточно хорошей миграционной способностью в водах, но из-за его значительно более низких содержаний в руде концентрация в твердом осадке снега на два порядка ниже, чем цинка. Расположение его ареолов связано

с размещением отходов горнодобывающего производства, в пределах хранилищ отходов добычи руд, на объектах бывшей обогатительной фабрики и возле отвалов штольни «Западная» (рис. 6). Нерастворимая часть шести проб снега исследована методом электронной микроскопии. Для исследования были отобраны пробы в местах хранения отходов разработки месторождений и на относительно чистых территориях. Установлено, что твердые осадки характеризуются зернистой структурой. В пробах отмечается небольшое количество органических включений в виде удлиненных волокон растений.

Минеральный состав твердых осадков, представленный в табл. 3, включает в себя порообразующие минералы и продукты выветривания руды и вмещающих вольфрамовое и молибденовое оруденение пород.

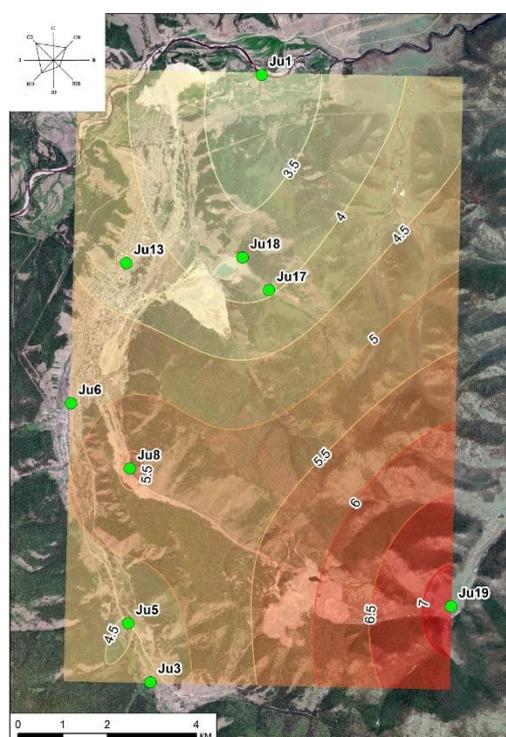


Рис. 6. Карта распределения кадмия в твердом осадке снежного покрова, мг/кг

Fig. 6. Map of cadmium distribution in snow cover solid sediment, mg/kg

Вещественный состав твердого осадка снежного покрова

Таблица 3

Table 3

Mineral composition of solid snow cover sediment

Наименование пробы	Состав	Масса, г
Ю-19	Алюмосиликаты (биотит), ксенотим, флюорит	0,9171
Ю-13	Биотит, ильменит, магнетит, кварц	5,8182
Ю-18	Магнетит, каолинит, хлорит, мусковит, гюбнерит	0,4812
Ю-8	Апатит, амфибол, ильменит, флюорит	0,7215
Ю-4	Вольфрамит, кварц, окислы серы	0,1982
Ю-1	Оксид железа, кварц, магнетит, амфибол	0,6153

Проба Ю-19 была отобрана в верховье р. Мыргеншено, на территории, которая подвергается воздействию хранилища отходов добычи руд. Здесь складированы вскрышные породы двух карьеров, с помощью которых разрабатывались Первомайское молибденовое и Холтосонское вольфрамовое месторождения. За период длительного хранения отходов они подверглись интенсивному физическому и химическому выветриванию, сформировалась выровненная поверхность, состоящая из мелких частиц, способных мигрировать в воздушной среде. В основном это глины, гидроксиды алюминия, железа, марганца. Из эндогенных минералов присутствуют относительно устойчивые минералы, представленные слюдами. Среди рудных минералов на разрабатываемых месторождениях в значимых количествах присутствует флюорит, который, оказывается, может рассеиваться за счет ветрового переноса. Этот минерал интенсивно разлагается в кислой среде и служит источником фторид-иона в водотоках. Холтосонское месторождение вольфрама характеризуется повышенными содержа-

ниями редкоземельных элементов. Ксенотим, который представляет собой ортофосфат иттрия, относительно устойчив в окислительных условиях и переносится ветром на окружающую территорию. Это может свидетельствовать о возможности расширения ареола загрязнения редкоземельными элементами за счет ветрового рассеяния от места складирования отходов добычи руд. Он может накапливаться в почвах окружающей территории.

Проба снега Ю-13 была отобрана в восточной части г. Закаменска, территория которого находится под пылевым воздействием Барун-Нарынского хвостохранилища ДВМК. В составе пыли присутствуют устойчивые к выветриванию минералы, которые находились в составе рудных тел. Хвостохранилище сформировано при переработке руд на обогатительной фабрике. Они издроблены и истерты в технологическом процессе и способны интенсивно переноситься ветром на окружающую территорию и загрязнять почвенный покров железом, титаном и другими химическими элементами.

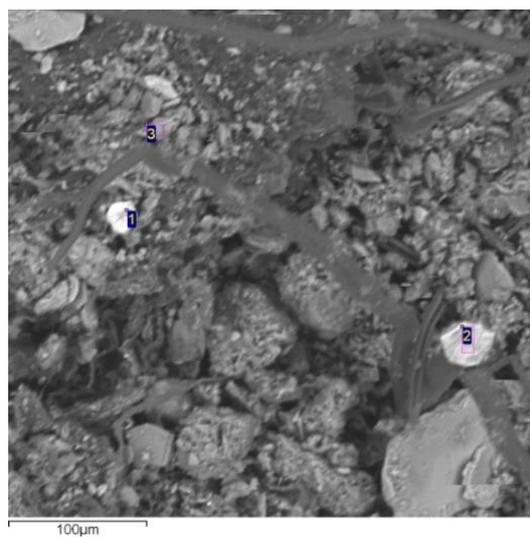
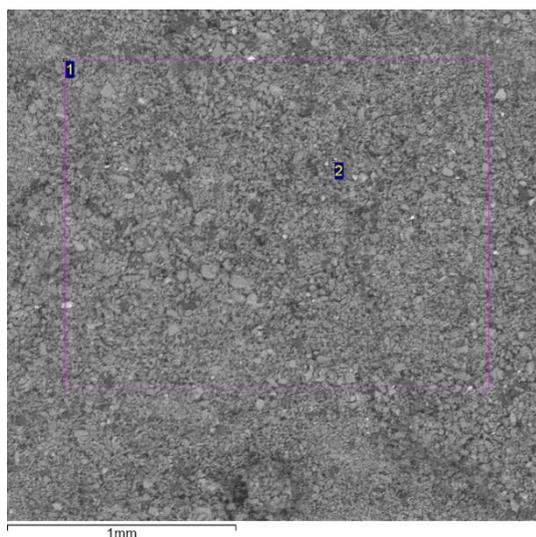


Рис. 7. Минерально-вещественный состав пробы Ю-13: 1, 2, 3 – частицы магнетита

Fig. 7. Mineral composition of sample Yu-13: 1, 2, 3 – particles of magnetite

Основную часть пробы Ю-13 составляет группа слюд (см. рис. 7). Биотит представлен пластинчатыми выделениями, которые имеют обохренные края. Большая часть биотита измельчена, присутствует в виде тончайшего илистого материала размером от 50 до 100 мкм. Размер частиц определен в соответствии с ГОСТ Р8.777-2011. Магнетит в пробе Ю-13 представлен октаэдрическими вкраплениями размером от 80 до 500 мкм. Кварц прослеживается в виде мелких пирамидообразных полупрозрачных кристаллов размером от 100 до 500 мкм.

Проба снега Ю-18 (рис. 8) отобрана в восточной части Зун-Нарынского хвостохранилища. Это хранилище отходов сформировано при вторичной переработке песков Барун-Нарынского хранилища. В результате вторичной переработки произошло разделение песков по размерности. В восточной части хвостохранилища отложилась наиболее тонкая фракция, которая оказалась способна к интенсивному водному и ветровому рассеиванию. Необходимо отметить, что в основном твердый осадок представлен аморфными частицами продуктов выветривания пород и руд,

среди которых выделяются отдельные зерна минеральных фаз. Среди минералов присутствуют продукты разрушения вмещающих оруденение пород – глины, слюдястые минералы, а также рудные минералы – магнетит, гюбнерит, шеелит. Гюбнерит имеет толстотаблитчатый утолщенный облик в виде крупнозернистого агрегата, встречаются частицы размером более 500 мкм. Шеелит встречается в форме псевдооктаэдрических частиц с неровными изломами размером от 100 до 300 мкм. Негативное экологическое воздействие этой части природно-техногенной системы может быть связано с рассеиванием на окружающую территорию очень тонкой пыли.

Проба снежного покрова Ю-8 отобрана в среднем течении руч. Инкур, который дренирует отходы добычи карьерным способом коренных месторождений вольфрама и молибдена. В этом районе также производится разработка глубокозалегающей россыпи вольфрамита. Фазовый состав твердого осадка снега представлен, главным образом, частицами обломочного характера с включениями в виде шарообразных

фрагментов (рис. 9). Среди минералов доминирует глинистый минерал – каолинит. В виде шарообразных включений обнаруживаются ильменит, амфибол, флюорит и апатит. Каолинит представлен обломками столбчатой, кубической, округлой, треугольной, угловатой, нитевидной, линзовидной и неправильной формы, чаще всего со сглаженными углами. Размер зёрен в среднем составляет 70–110 мкм. Ильменит прослеживается в виде пластинчатых включений тетраэдрной формы, относительно общей массы отличается белым и светло-серым цветом. Размер частиц около 100 мкм. Нерудная часть пробы представлена полевыми шпатами (плаггиоклаз, калиевый полевой шпат), амфиболами, слюдой (биотит), эпидотом, кварцем. Железо находится преимущественно в форме магнетита.

Эта часть природно-техногенной системы оказывает негативное воздействие на экологическое состояние окружающей территории за счет переноса тонкой пыли, в составе которой могут доминировать глинистые минералы.

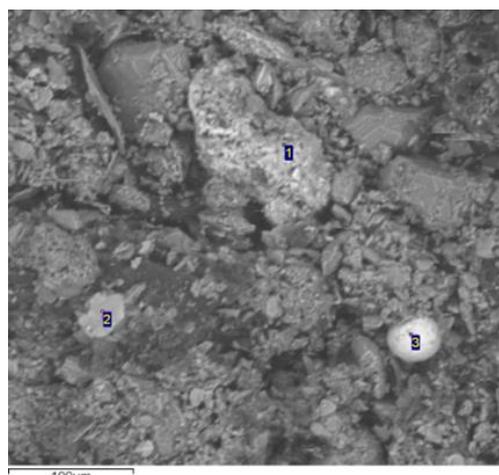
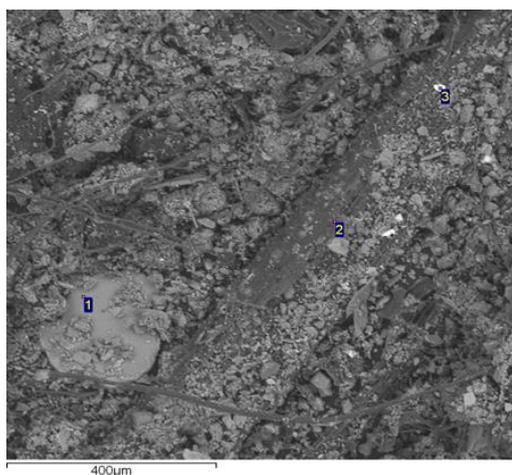


Рис. 8. Минерально-вещественный состав пробы Ю-18: 1, 2 – частицы мусковита, 3 – частица магнетита
 Fig. 8. Mineral composition of sample Yu-18: 1, 2 – muscovite particles, 3 – magnetite particle

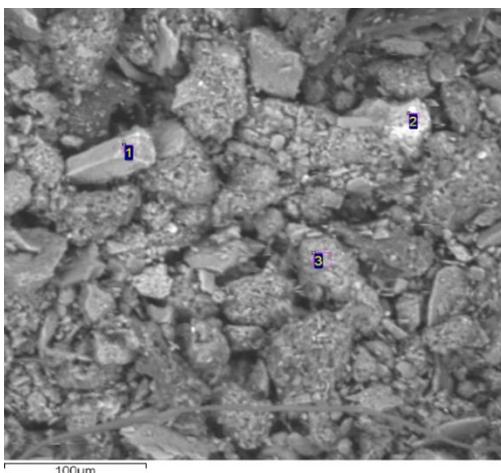


Рис. 9. Минерально-вещественный состав пробы Ю-8: 1, 3 – частицы ильменита, 2 – частица амфибола
 Fig. 9. Mineral composition of sample Yu-8: 1, 3 – ilmenite particles, 2 – amphibole particles

Проба снега Ю-4 отобрана в районе штольни «Западная», где складированы извлеченные из недр руды и вмещающие породы. Из штольни изливаются рудничные воды, содержащие в своем составе тонкую взвесь гидроксидов железа, марганца. В составе твердой фазы снежного покрова установлены рудные минералы и продукты разрушения окolorудных измененных пород. Минеральный состав твердого осадка снежного покрова позволяет предполагать длительное загрязнение почв на окружающей территории токсичными химическими элементами при выветривании эндогенных минералов.

Проба снега Ю-1 отобрана в долине р. Джиды, на границе рассматриваемой природно-техногенной системы. Минеральный состав в твердом остатке снега представлен в основном продуктами физического и химического выветривания пород. Здесь определены устойчивые к выветриванию кварц, магнетит, биотит, амфибол. Минеральный состав твердой фазы снежного покрова здесь сформирован за счет ветрового разноса пыли с нарушенной горными работами окружающей поверхности.

Таким образом, на основании минерального состава твердого осадка, выделенного из снежного покрова, можно утверждать, что пылевой состав снега формируется в основном за счет разноса рыхлых образований, непосредственно примыкающих к месту опробования снега.

Заключение

Изучение химического и минерального состава твердого осадка снежного покрова в г. Закаменске и

на прилегающих территориях показывает, что основными очагами загрязнения атмосферного воздуха являются территории складирования техногенных отходов. Наиболее загрязнен пылью на изучаемой территории снежный покров в верхней части долины р. Мыргеншено, где расположено хранилище отходов добычи; долина р. Модонкуль, руч. Инкур и пади руч. Барун-Нарын и Зун-Нарын, где размещены хранилища переработки руд ДВМК и АО «Закаменск».

Содержания химических элементов в твердом остатке снежного покрова значительно превышают средние значения в почвах городов. Построены моноэлементные карты распределения содержаний токсичных элементов на территории природно-техногенной системы ДВМК и г. Закаменска, обоснован механизм формирования ореолов.

Формированию контрастных аномалий загрязнения снежного покрова взвешенными веществами благоприятствует измельчение горных пород в технологическом процессе и закисление поверхностных и подземных вод. Присутствие большого количества оксидов железа свидетельствует об окислительной обстановке на рассматриваемой территории, токсичные элементы в составе взвеси оксидов могут мигрировать на большие расстояния [Воронина, Плюснин, 2022].

Минеральный состав твердых осадков снежного покрова в районе исследования типичен для вольфрамовых месторождений, он может быть использован для прогноза трансформации загрязнения во времени.

Список источников

- Алексенко В.А.** Геоэкология: экологическая геохимия : учебник. 2-е изд., перераб. Ростов н/Д : Феникс, 2017. 685 с.
- Будаева Ю.С., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Торосян Е.С.** Эколого-геохимическая оценка территории Г. Юрга по данным изучения снегового покрова (Кемеровская область) // Инженерная экология – 2021 : докл. междунар. симп., Москва, 01–03 декабря 2021 года. М. : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2021. С. 123–127.
- Бычков А.Ю.** Геохимия. Часть 2 : конспект лекций. М. : МГУ, 2015. 186 с.
- Василевич М.И., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М.** Химический состав снегового покрова на территории таежной зоны Республики Коми // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 4. С. 494–506.
- Володина Д.А., Таловская А.В.** Статистический анализ геохимических данных по составу твердой фазы снегового покрова в районах расположения цементных заводов (Юг Западной Сибири) // Проблемы экоинформатики : материалы XV Междунар. симп., Москва, 06–08 декабря 2022 года / под ред. Ф.А. Мкртчяна. М. : Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2022. С. 161–165.
- Воронина Ю.С., Плюснин А.М.** Оценка аэрозольного загрязнения в местах складирования отходов ДВМК // Современные направления развития геохимии : материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвященной 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона, Иркутск, 21–25 ноября 2022 года. Иркутск : Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. С. 116–118.
- ГОСТ Р 8.777-2011.** Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения. М.: Стандартинформ, 2012. 8 с.
- Кирина В.Д., Таловская А.В., Язиков Е.Г.** Динамика пылевой нагрузки на снеговой покров на территории г. Кемерово // Инженерная экология – 2023 : материалы международного симпозиума, Москва, 05–07 декабря 2023 года. М. : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2023. С. 218–221.
- Мынбаева Б.Н., Есиркепова А.С.** Оценка качества атмосферного воздуха г. Алматы математическими методами // Успехи современного естествознания. 2011. № 5. С. 122–124.
- Осипова Н.А., Осипов К.Ю., Таловская А.В. и др.** Содержание токсичных элементов в уличной пыли и оценка риска для здоровья человека (Междуреченск, Южный Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 3. С. 229–244.

Осипова Н.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г. [и др.] Содержание полициклических ароматических углеводородов в уличной пыли угледобывающего региона Южного Кузбасса // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 2. С. 21–35.

Плюснин А.М., Воронина Ю.С., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Перязева Е.Г., Чебыкин Е.П. Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрамо-молибденовых руд // Геохимия. 2023. Т. 68, № 11. С. 1–17.

Плюснин А.М., Гунин В.И. Природные гидрогеологические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на примере Забайкалья). Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2001. 137 с.

Просекин С.Н., Амосова А.А., Чубаров В.М., Бычинский В.А. Оценка эколого-геохимического состояния техногенно-нагруженных пригородных районов г. Шелехов и г. Иркутск по данным снегогеохимического мониторинга // Геосферные исследования. 2023. № 3. С. 140–153.

Смирнова Д.Н. Экологическая оценка качества атмосферного воздуха методом лишеноиндикации // Научный поиск. 2014. № 2.1. С. 88.

Смирнова О.К., Плюснин А.М. Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ : Бурятский научный центр Сибирского отделения РАН, 2013. 181 с.

Чередова Т.В., Дорошкевич С.Г. Гранулометрический и минеральный состав твердого осадка снегового покрова на территориях г. Улан-Удэ, подверженных техногенному изменению // Кожа и мех в XXI веке: технология, качество, экология, образование : материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф., Улан-Удэ, 11–13 декабря 2021 года. Улан-Удэ : Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2022. С. 100–105.

References

Alekseenko V.A. *Geoekologiya: ekologicheskaya geokhimiya* [Geoecology: Environmental Geochemistry]: uchebnik. 2-e Izd., pererab. Rostov-na-Donu: Feniks, 2017. 685 p. In Russian

Budaeva Yu.S., Talovskaya A.V., Yazikov Ye.G., Torosyan Ye.S. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka territorii G. Yurga po dannim izucheniya snegovogo pokrova (Kemerovskaya oblast)* [Ecological and geochemical assessment of the territory of G. Yurga based on the study of snow cover (Kemerovo Region)] // Inzhenernaya ekologiya – 2021: Dokladi mezhdunarodnogo simpoziuma, Moskva, 01–03 dekabrya 2021 goda. M.: Rossiiskoe nauchno-tekhnicheskoe obshchestvo radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A.S. Popova, 2021. pp. 123–127. In Russian

Bichkov A.Yu. *Geokhimiya. Chast 2: konspekt lektzii* [Geochemistry. Part 2: Lecture Notes]. Moscow: MGU, 2015. 186 p. In Russian
Vasilevich M.I., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. *Khimicheskii sostav snegovogo pokrova na territorii taezhnoi zoni Respubliki Komi* [Chemical composition of the snow cover in the taiga zone of the Komi Republic] // Vodnie resursi [Water resources]. 2011. V. 38, No. 4. pp. 494–506. In Russian

Volodina D.A., Talovskaya A.V. *Statisticheskii analiz geokhimicheskikh dannikh po sostavu tverdoi fazi snegovogo pokrova v raionakh raspolozheniya tsementnykh zavodov (Yug Zapadnoi Sibiri)* [Statistical analysis of geochemical data on the composition of the solid phase of snow cover in the areas where cement factories are located (South of Western Siberia)] // Problemi ekoinformatiki : Materiali XV Mezhdunarodnogo simpoziuma, Moskva, 06–08 dekabrya 2022 goda / Pod redaktsiei F.A. Mkrtchyan. Moscow : Moskovskoe NTO radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A.S. Popova, 2022. pp. 161–165. In Russian

Voronina Yu.S., Plyusnin A.M. *Otsenka aerezolnogo zagryazneniya v mestakh skladirovaniya otkhodov DVMK* [Assessment of aerosol pollution at waste storage sites] // Sovremennye napravleniya razvitiya geokhimii : materialy Vserossiiskoi konferentsii (s uchastiem zarubezhnykh uchenikh), posvyashchyonnoi 65-letiyu Instituta geokhimii im. A.P. Vinogradova i 105-letiyu so dnya rozhdeniya akademika L.V. Tausona, Irkutsk, 21–25 noyabrya 2022 goda. Irkutsk: Institut geografii im. V.B. Sochavi Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2022. pp. 116–118. In Russian

GOST R 8.777-2011. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmerenii. Dispersnii sostav aerezolei i vzvesei. Opredelenie razmerov chastits po difraktsii lazernogo izlucheniya*. [State system for ensuring the uniformity of measurements. Dispersive composition of aerosols and suspensions. Determination of particle sizes by laser diffraction] Moscow : Standartinform, 2012. 8 p. In Russian

Kirina V.D., Talovskaya A.V., Yazikov Ye.G. *Dinamika pilevoi nagruzki na snegovoi pokrov na territorii g. Kemerovo* [Dynamics of dust load on snow cover in the city of Kemerovo] // Inzhenernaya ekologiya – 2023 : Materiali mezhdunarodnogo simpoziuma, Moskva, 05–07 dekabrya 2023 goda. M.: Rossiiskoe nauchno-tekhnicheskoe obshchestvo radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A.S. Popova, 2023. pp. 218–221. In Russian

Minbaeva B.N., Yesirkepova A.C. *Otsenka kachestva atmosfernogo vozdukha g. Almaty matematicheskimi metodami* [Assessment of the atmospheric air quality in Almaty using mathematical methods] // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. 2011. No. 5. pp. 122–124. In Russian

Osipova N.A., Osipov K.Yu., Talovskaya A.V. i dr. *Soderzhanie toksichnykh elementov v ulichnoi pili i otsenka riska dlya zdorovya cheloveka (Mezhdurechensk, Yuzhnyi Kuzbass)* [Toxic elements in street dust and human health risk assessment (Mezhdurechensk, Southern Kuzbass)] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2023. V. 334, No. 3. pp. 229–244. In Russian

Osipova N.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. [et al.] The content of polycyclic aromatic hydrocarbons in the street dust of the coal-mining region of the Southern Kuzbass // Bulletin of the Transbaikal State University. 2024. V. 30, No. 2. pp. 21–35. In Russian

Plyusnin A.M., Voronina Yu.S., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Peryazeva Ye.G., Chebikin Ye.P. *Zagryaznenie atmosfery ot khranilishch otkhodov dobichi i pererabotki volframo-molibdenovykh rud* [Atmospheric pollution from waste storage facilities for the extraction and processing of tungsten-molybdenum ores] // *Geokhimiya* [International geochemistry]. 2023. V. 68, No. 11. pp. 1–17. In Russian

Plyusnin A.M., Gulin V.I. *Prirodnye gidrogeologicheskie sistemi, formirovanie khimicheskogo sostava i reaktsiya na tekhnogennoe vozdeistvie (na primere Zabaikalya)* [Natural hydrogeological systems, formation of chemical composition, and response to anthropogenic impact (on the example of Transbaikalia)]. Ulan-Ude : Izd-vo BNTs SO RAN. 2001. 137 p. In Russian

Prosekin S.N., Amosova A.A., Chubarov V.M., Bichinskii V.A. [Assessment of the ecological and geochemical state of technogenically loaded suburban areas in Shelekhov and Irkutsk based on snow geochemical monitoring data] // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2023. 3. pp. 140–153. In Russian

Smirnova D.N. *Ekologicheskaya otsenka kachestva atmosfernogo vozdukhа metodom likhenoidikatsii* [Environmental assessment of atmospheric air quality using lichenoidication] // Nauchnii poisk. 2014. No. 2.1. pp. 88. In Russian

Smirnova O.K., Plyusnin A.M. *Dzhidinskii rudnii raion (problemi sostoyaniya okruzhayushchei sredi)* [Dzhidinsky Ore District (Environmental Issues)]. Ulan-Ude : Buryatskii nauchnii tsentr Sibirskogo otdeleniya RAN. 2013. 181 p. In Russian

Cheredova T.V., Doroshkevich S.G. *Granulometricheskii i mineralnii sostav tverdogo osadka snegovogo pokrova na territoriyakh g. Ulan-Ude, podverzhennikh tekhnogennomu izmeneniyu* [Granulometric and mineral composition of the solid snow cover in the territories of Ulan-Ude, which are subject to technogenic changes] // Kozha i mekh v XXI veke: tekhnologiya, kachestvo, ekologiya, obrazovanie : Materiali XVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Ulan-Ude, 11–13 dekabrya 2021 goda. Ulan-Ude: Vostochno-Sibirskii gosudarstvennii universitet tekhnologii i upravleniya. 2022. pp. 100–105. In Russian

Информация об авторах:

Воронина Ю.С., преподаватель, кафедра «Промышленная экология и защита в чрезвычайных ситуациях», Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: u_voronina96@mail.ru

Плюснин А.М., доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией гидрогеологии и геоэкологии, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: plusnin-53@mail.ru

Чудинова О.Н., кандидат биологических наук, доцент, кафедра «Промышленная экология и защита в чрезвычайных ситуациях», Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: chudinova1980@inbox.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Voronina Yu.S., Lecturer, Department of Industrial Ecology and Protection in Emergency Situations, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: u_voronina96@mail.ru

Plyusnin A.M., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology, N.L. Dobretsov Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: plusnin-53@mail.ru

Chudinova O.N., Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Department of Industrial Ecology and Protection in Emergency Situations, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: chudinova1980@inbox.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.08.2024; одобрена после рецензирования 29.05.2024; принята к публикации 20.11.2025

The article was submitted 06.08.2024; approved after reviewing 29.05.2024; accepted for publication 20.11.2025