

ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ОТ ХРАНИЛИЩ ОТХОДОВ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ ВОЛЬФРАМ-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД¹

© 2023 г. А. М. Плюснин^{a, *}, Ю. С. Воронина^a, А. В. Украинцев^{a, **}, М. К. Чернявский^a,
Е. Г. Перязева^a, Е. П. Чебыкин^{b, c}

^aГеологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, ул. Сахьяновой, ба, Улан-Удэ, 670047 Россия

^bЛимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033 Россия

^cИнститут земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

*e-mail: plyusnin@inst.ru

**e-mail: ukraintsev87@bk.ru

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 08.06.2023 г.

Принята к публикации 09.06.2023 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований загрязнения приземной атмосферы отходами добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд с использованием разработанной 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, кремния, марганца, цинка, фосфора. Эти элементы формируют ореол загрязнения атмосферы над техногенными песками и далее воздушными потоками рассеиваются на окружающей территории. В зимний период за счет ветряного рассеивания аэрозолей на обширной территории загрязняется снежный покров. Ореол загрязнения снега составляет десятки квадратных километров. Установлена зависимость качественного и количественного состава загрязняющих компонентов снежного покрова от времени хранения продуктов переработки руд. Показано, что часть токсичных элементов поступает в раствор при таянии снега из взвешенных веществ, которые приносятся ветром с территории, где почвенный покров нарушен горными работами.

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

DOI: 10.31857/S0016752523110092, **EDN:** OSCIETL

ВВЕДЕНИЕ

Техногенное воздействие приводит к значительным изменениям состава фоновых аэрозолей, особенно в увеличении доли сульфатов в нижней атмосфере. Даже в незаселенных местах северного полушария среднее количество сульфатов в столбе воздуха оценивается, как в два раза превышающее доиндустриальное количество (Аэрозоль и климат, 1991). Среди загрязнителей атмосферы особое место занимают тяжелые металлы. Канцерогенные свойства соединений никеля и шестивалентного хрома установлены многими исследователями, они вызывают рак легких. Аналогично воздействует на организм и кадмий, кроме того он провоцирует развитие опухоли предстательной железы (Сихинбаева, 2013). В районах хранения отходов, даже после прекращения деятельности горно-

добывающих предприятий, происходит загрязнение ландшафта многими токсичными химическими элементами и соединениями (Бортникова и др., 2006; Рыбникова, 2019; Дорошкевич и др., 2017). Имеются данные о влиянии пыли, образующейся на территории отходов обогащения руд Джидинского вольфрамо-молибденового комбината (ДВМК). Экспериментально доказано, что пыль вызывает легочное воспаление и сосудистую дисфункцию (Zychowski et al., 2019). Выявлена прямая корреляционная зависимость между концентрацией Pb и Cd во вдыхаемой фракции пыли и воспалением легких (Смирнова и др., 2019).

Загрязнение атмосферного воздуха в местах хранения отходов горнодобывающего производства не вызывает сомнения, так как хранящиеся породы издроблены в технологическом процессе, складированы на большой площади, не закреплены растительным покровом. Под воздействием ветра пыль может попадать в атмосферу и перено-

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0016752523110092 для авторизованных пользователей.

ситься на окружающую территорию. Вероятно, интенсивность миграции твердых частиц в воздушной среде от хранилищ отходов горнорудного производства определяет ветряной режим. При каких условиях формируются ореолы аэрозольного загрязнения над поверхностью отходов до сих пор не выяснено. Представленная статья направлена на выявление главных факторов, которые определяют миграцию токсичных химических элементов в воздушной среде в горнорудных районах. Исследования проведены в Джидинском районе, где длительное время велась разработка двух вольфрамовых и одного молибденового месторождения Джидинским вольфрамо-молибденовым комбинатом. Разработка велась вначале с использованием штолен, а затем с помощью двух карьеров. Руда перемещалась к обогащательной фабрике по канатной дороге. На фабрике руда измельчалась, из нее извлекался флотационно-гравитационным методом молибденовый и вольфрамовый концентрат. Все другие рудные компоненты, представленные пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, флюоритом, вместе с вмещающими породами перемещались в хранилище. Отходы переработки залегают в виде песчаных залежей мощностью 5–10 м, которые открыты для проникновения газов и влаги из атмосферы. Под воздействием кислорода, воды и других агентов выветривания они интенсивно разрушаются. За длительный период хранения порошковые воды техногенных песков стали кислыми (Плюснин и др., 2020). Они не замерзают в зимний период, их минерализация возрастает за счет вымораживания воды и интенсификации окислительного выщелачивания металлов концентрированной серной кислотой (Маркович, Птицын, 1998).

Над техногенной залежью, содержащей в своем составе сульфидные минералы, продукты их окислительного разрушения, органические вещества, использовавшиеся при флотации руды, формируется ореол загрязнения воздуха, который существует круглый год. Установлено, что воздух, находящийся в порах пород, загрязняется газами, состоящими из сероуглерода, диметилсульфида, паров воды и других компонентов (Бортникова и др., 2020). Одновременно с газами в зону аэрации выносятся техногенные аэрозоли, состоящие из частиц жидких и твердых продуктов выветривания руды и вмещающих пород. Процессы, определяющие миграционную активность токсичных компонентов в воздушной среде, до конца не изучены, не определены количественные характеристики мигрирующих химических элементов. Целью представленной работы было определение круга токсичных компонентов, которые поступают в атмосферу от мест хранения отходов добычи и переработки руд, с определением их концентрации в приземном слое и ролью в загрязнении территории.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в полевых и лабораторных условиях. В полевых условиях в летний период проводились эксперименты по сбору конденсата в местах хранения отходов переработки и добычи руд с целью выявления интенсивности потоков аэрозольного загрязнения. В зимний период изучался химический состав снежного покрова, который сформировался в исследуемом районе и на окружающей территории. Как известно, снег является депонирующей средой и широко используется для характеристики техногенного влияния на состояние окружающей среды.

Схема опробования конденсата в отходах переработки руд приведена на рис. 1. Опробование проведено по трем профилям в Барун-Нарынском хвостохранилище и одному профилю в Зун-Нарынском хранилище. Первое хранилище сформировано в период деятельности Джидинского вольфрамо-молибденового комбината, здесь пески хранятся более 25 лет. Второе хвостохранилище формируется ООО «Закаменск», которое занимается вторичной переработкой песков в настоящее время, оно постоянно пополняется промытыми песками, поступающими с фабрики.

В Барун-Нарынском хвостохранилище один профиль заложен в его северо-западной части, вблизи оградительной дамбы. В этом месте складированы пески ДВМК, намывные в 1990-х гг. прошлого столетия. Два других профиля заложены в южной части хвостохранилища, где складированы пески ранее существовавшего насыпного хранилища. Они содержат в своем составе высокие содержания сульфидных минералов. В Зун-Нарынском хранилище профиль пройден в месте складирования песков после промывки на обогащательной фабрике, песчаный массив сформирован за год до проведения исследований.

Схема опробования отходов добычи руды приведена на рис. 2. Разработка месторождений велась двумя карьерами, которые расположены на вершине горы с абсолютными отметками местности 1670 м. Площадка, на которой производилась разработка карьеров, выполнена кристаллическими горными породами. Они интенсивно раздроблены при проведении взрывных работ и проницаемы для воды. Вскрышные породы складировались на склонах окружающих глубоко врезаемых долин ручьев. Эти отходы представлены крупно глыбовым материалом, который хорошо проницаем для воды и газов. После закрытия комбината отходы добычи не рекультивировались. За время хранения в результате протекания физического и химического выветривания горные породы преобразованы в мелкие обломки коренных пород и осадки продуктов их выветривания. Они перемещаются в виде осыпей вниз по склону. У подножия склона



Рис. 1. Спутниковый снимок со схемой опробования конденсационной влаги и снежного покрова. Условные обозначения: 1 — пески хвостохранилищ, 2 — город Закаменск, 3 — фабрика вторичной переработки песков, 4 — техногенные водоемы, 5 — места отбора конденсата, 6 — места опробования снежного покрова.

накоплена толща, представленная тонкими разностями дресвы, песка, суглинков и глин (рис. 2).

При экспериментальных исследованиях отходов добычи конденсаторы аэрозолей устанавливались на осадочных породах с разной размерностью частиц и на коренных породах. Конденсационную влагу удалось собрать только из осадочных пород, представленных песчаным и супесчаным материалом. На породах, представленных крупно глыбовым материалом и трещиноватыми коренными породами, влага, поступающая из атмосферы, проникает по трещинам глубоко в недра и не участвует в формировании ореола аэрозолей. В этом случае вода удаляется подземным стоком за пределы размещения отходов.

Опробование снежного покрова проведено в пределах водосбора рек Модонкуль и Мыргеншено, которые впадают в реку Джида. На этой территории размещены основные объекты природно-техногенной системы Джидинского вольфрамо-молибденового комбината и город Закаменск, для которого комбинат был градообразующим предприятием. Схема опробования приведена на рис. 3.

Методики отбора проб, пробоподготовки и анализа снега подробно описаны (Василенко и др., 1995; Методические указания..., 1990, Назаров и др., 1978). Для отбора пробы снега на его поверхности располагалась картонная рамка размером 50×50 см ($S = 0.25$ м²). Снег отбирался внутри рамки на всю его мощность. Отбор производился пластиковым совком. Вся масса снега собиралась в полиэтиленовый пакет. Доставленный в лабораторию снег плавился при комнатной температуре. Вода сливалась в стеклянную посуду, фильтровалась через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм и готовилась для проведения химического анализа. Проба свежеснегавшего снега составляла от 30 до 37 л, проба снега в конце марта была от 60 до 75 л.

Для исследования химического состава воды, испаряющейся с поверхности хранилищ отходов, использована методика конденсирования ее паров на поверхности полиэтилена. Для этого была изготовлена специальная установка. В ее состав входит корпус, состоящий из четырех гибких пластиковых пластин, герметично соединенных между собой в замкнутый контур, посредством



Рис. 2. Спутниковый снимок участка складирования отходов добычи руд. Условные обозначения: 1 — карьер с водоемом, 2 — растительность у подножия склонов, 3 — осыпи вскрышных пород, 4 — места установки конденсаторов.

резьбовых соединений, из неметаллических материалов. На корпус сверху натягивается пленочный прозрачный водонепроницаемый материал и фиксируется резиновым жгутом. В центр на пленочный материал помещается груз массой 200–300 г. Под пленкой устанавливается контейнер для сбора конденсата. Контейнер находится под устанавливаемым грузом, но не касается пленочного материала. Контейнер изготовлен из пластика в виде емкости на ножках. Ножки необходимы для того, чтобы контейнер не перекрывал поверхность грунта, с которой осуществляется сбор конденсата. Площадь поверхности, с которой производится сбор конденсата составляет 1 м². Для увеличения достоверности полученных результатов в каждом пункте наблюдения одновременно устанавливалось пять сборников конденсата. Расстояние между сборниками составляла 20 м, такой способ размещения конденсаторов позволял охарактеризовать потоки аэрозольей с большой площади и нивелировать неоднородности в строении песков, связанные с технологией складирования отходов. Сборники конденсата уста-

навливались в точке наблюдения вечером и снимались утром. Выбранный режим отбора проб был связан с тем, что в районе исследований климат характеризуется резким изменением температуры в течение суток. В летний период разница температуры достигает двадцати и более градусов. Пески за день прогреваются, заключенная в них вода начинает интенсивно испаряться, но сконденсировать ее сложно, для этого необходимо использовать холодильники. Ночью воздух над песками быстро охлаждается, поэтому испаряющаяся из песков влага хорошо конденсируется на внутренней поверхности полиэтиленовой пленки. Образующиеся капли стекают в контейнер, который расположен под пленкой. Накопившийся в контейнере конденсат сливался в пластиковую посуду и готовился для проведения анализов. В части конденсата, если позволял его объем, непосредственно на точке наблюдения измерялся рН растворов. Другая часть пробы конденсата фильтровалась через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм и готовилась для проведения химического анализа.

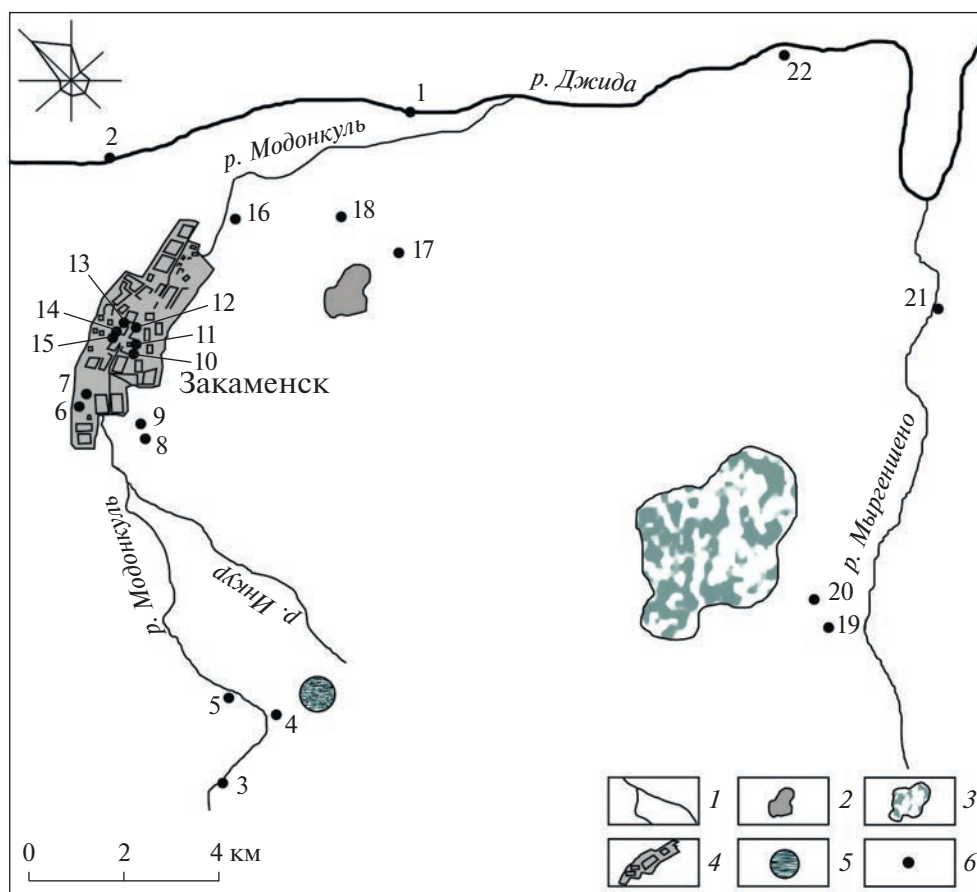


Рис. 3. Схема опробования снежного покрова г. Закаменск и его окрестностей, испытывающих воздействие отходов добычи и переработки вольфрамо-молибденовых руд. Условные обозначения: 1 — гидросеть, 2 — Барун-Нарынское и Зун-Нарынское хвостохранилища, 3 — место размещения отходов добычи руды открытым способом, 4 — территория города Закаменск, 5 — отвалы пород из штольни «Западная», 6 — места отбора снега.

Опробование конденсата проводилось в два этапа. Первый раз опробовался конденсат на отходах переработки руд, пробы были отобраны в период с 06.08.2021 по 11.08.2021 г. Второй раз опробовался конденсат на территории размещения отходов добычи руд в период с 11.06.2022 по 13.06.2022 г.

Снежный покров опробовался дважды. Первый раз проведено опробование с 23.03.2021 по 25.03.2021 г., в этот период были отобраны пробы снега на всей территории размещения отходов добычи и переработки руд на территории г. Закаменск и окружающей территории. Второй раз опробование проведено 26.01.2022 г., пробы снега отобраны в хвостохранилищах.

Пробы конденсата и снеговой воды для определения микроэлементов отбирали одноразовыми медицинскими шприцами объемом 10 мл в количестве 2 мл, фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (0.45 мкм, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия). Филь-

трат помещали в предварительно взвешенные полипропиленовые пробирки Эппендорфа (2 мл, Axugen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США), содержащие 40 мкл 70% HNO_3 . Азотная кислота была дважды очищена с помощью суббуйлинговой системы перегонки кислот Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония. Для отслеживания дрейфа прибора и степени подавления аналитических сигналов использовался индий (30 ppb), который добавлялся в исследуемые образцы весовым методом. Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах Mettler Toledo AG 104 (погрешность взвешивания ± 0.0003 г).

Анализ микроэлементного состава выполнен методом индуктивно-связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 се в Лимнологическом институте СО РАН согласно методике, описанной в (Чебыкин и др., 2012). Система ввода проб: микропоточный полипропиленовый распылитель (200 мкл/мин, режим подачи растворов — самораспыление), полипропиленовая распылительная камера, кварцевая горелка с

Таблица 1. Макрокомпонентный состав конденсата воды собранного над поверхностью хвостохранилищ, мг/л

Хвостохранилище (наименование профиля опробования)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Формула Курлова
Предел обнаружения (мг/л)	0.0004	0.0005	0.01	0.02	0.01	0.01	0.5	
Барун-Нарын (ДХ1–ДХ5)	0.18–2.3 0.75	0.1–0.55 0.25	0.03–0.4 0.32	2.5–44 2.7	0.4–30 21.4	0.02–1.3 0.7	1–69 63	0.118HCO ₃ 69SO ₄ 30 Ca96
Барун-Нарын (ДХ6–ДХ10)	0.62–1.1 0.83	0.74–3.0 2.18	0.3–0.62 0.51	21–27 24.4	0.2–12 8.1	0.04–2.9 1.4	1.1–84 70	0.11HCO ₃ 84SO ₄ 12 Ca90
Барун-Нарын (ДХ16–ДХ20)	0.72–1.3 0.93	0.68–2.1 1.41	0.23–1.2 0.73	4.1–22 15.7	0.3–34 16.2	0.06–6 2.1	0.6–60 36	0.075HCO ₃ 60SO ₄ 34 Ca85
Зун-Нарын (ДХ11–ДХ15)	0.81–1.4 1.17	0.76–1.3 0.96	1.4–3.7 2.34	8.6–14 10.1	0.9–64 42.8	0.03–2 1.2	0.5–34 29	0.097SO ₄ 64HCO ₃ 34 Ca65Mg25

системой ShieldTorch. Измерения проводили в режиме “горячей плазмы” (мощность генератора плазмы 1580 Вт). Измерения проводились в сканирующем режиме (3 канала на массу, 0.05 с на канал, общее время сканирования масс-спектра — 55 с). Промывка между пробами — 50 с, между пробами и калибровочным стандартным раствором — 200 с. Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, USA), образец байкальской бутылированной воды (для Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, (Suturin et al., 2003), а также растворы катионов (Na, Mg, K, Ca, Fe, Hg) и анионов (Si, P, S, Cl, Br, I), приготовленные смешением одноэлементных ИСП-МС стандартных растворов компании Inorganic Ventures (США): Na (Cat. No. MSNA-100PPM), Mg (Cat. No. MSMG-100PPM), K (Cat. No. MSK-100PPM), Ca (Cat. No. CGCA1), Fe (Cat. No. MSFE-100ppm), Hg (Cat. No. MSHGN-10PPM), Si (Cat. No. MSS1-100PPM), P (Cat. No. MSP-100ppm), S (Cat. No. CGS1), Cl (Cat. No. CGICCL1), Br (Cat. No. CGICBR1), I (Cat. No. CGICI1). Металлы и Si в стандартных растворах присутствовали в азотнокислой среде, S и P в форме серной ортофосфорной кислот соответственно, галогениды — в водном растворе аммонийных солей. Методика анализа позволяет определять в пробах воды одновременно 72 химических элемента, включая щелочные, щелочноземельные, редкие, редкоземельные, благородные, радиоактивные и др. Результаты анализа приведены в Приложении.

Для анализа анионного состава конденсата использовался метод ионной хроматографии. Анализ выполнен на хроматографе LC-20 Prominence в центре коллективного пользования “Геоспектр” ГИН СО РАН, диапазон определения от 0.01 мг/л. Использована методика ЛИН СО РАН (Методика выполнения..., 2008).

Средний химический состав представлен в виде формулы Курлова, которая представляет собой псевдодробь, в числителе которой записываются анионы (в процентах количества вещества эквивалента) в порядке убывания их содержания. В знаменателе в таком же порядке располагаются катионы (Курлов, 1928).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Отходы переработки руд

В табл. 1 приведен макрокомпонентный состав конденсационных вод. Представленные значения являются средними арифметическими из пяти проанализированных проб, отобранных на каждом профиле.

Установлено, что относительно более минерализован конденсат, собранный на Барун-Нарынском хвостохранилище, среднее значение общей минерализации составляет 101 мг/л. В анионном составе преобладает гидрокарбонат-ион, в катионном составе доминирует кальций. Другой химический состав имеют конденсационные воды на Зун-Нарынском хранилище. Здесь среди анионов преобладает сульфат-ион, гидрокарбонат имеет подчиненное значение. В катионном составе преобладает кальций и в значимых количествах присутствует магний. Общая минерализация конденсата в Зун-Нарынском хвостохранилище в среднем составляет 97 мг/л. Объем конденсата составлял 10–30 мл, поэтому pH измерить не удалось, лакмусовая бумажка показывала слабокислую среду.

В табл. 2 приведены содержания халькофильных элементов. В числителе приведены минимальные и максимальные содержания, средние содержания металлов, установленные в конденсационных водах, приведены в знаменателе.

Таблица 2. Содержание халькофильных металлов в конденсате, собранном над поверхностью хвостохранилищ, мкг/л

Хранилище (наименование профиля опробования)	Mn	Fe	Zn	Cu	Pb	Ni	Co	Cr	Cd
Предел обнаружения, мкг/л	0.02	1	0.9	0.3	0.03	0.03	0.001	0.1	0.003
Барун-Нарын (ДХ1–ДХ5)	$\frac{1.3-6.9}{4.5}$	$\frac{36-350}{127}$	$\frac{3.7-14.9}{6.02}$	$\frac{0.51-1.71}{1.29}$	$\frac{0.7-2.8}{1.23}$	$\frac{0.55-0.97}{0.71}$	$\frac{0.05-0.57}{0.28}$	$\frac{0.75-0.87}{0.83}$	$\frac{0.03-0.14}{0.08}$
Барун-Нарын (ДХ6–ДХ10)	$\frac{6.0-10.6}{8.5}$	$\frac{55-123}{100}$	$\frac{6.9-31}{23.4}$	$\frac{3.0-47}{15.82}$	$\frac{2.9-23}{8.1}$	$\frac{1.08-1.84}{1.43}$	$\frac{0.13-0.49}{0.32}$	$\frac{1.02-1.2}{1.15}$	$\frac{0.1-0.43}{0.28}$
Барун-Нарын (ДХ16–ДХ20)	$\frac{40-530}{432}$	$\frac{59-490}{269}$	$\frac{45-680}{325}$	$\frac{12.2-210}{104}$	$\frac{2.0-16.4}{5.6}$	$\frac{3.7-10.4}{5.4}$	$\frac{0.45-10.8}{4.8}$	$\frac{0.66-1.52}{0.93}$	$\frac{0.62-12.4}{7.34}$
Зун-Нарын (ДХ11–ДХ15)	$\frac{1050-3500}{2052}$	$\frac{880-3500}{1942}$	$\frac{690-2400}{1352}$	$\frac{240-820}{476}$	$\frac{1.5-2.9}{2.1}$	$\frac{10.2-30.0}{18.4}$	$\frac{10.6-30.0}{18.3}$	$\frac{0.73-1.01}{0.79}$	$\frac{13.3-45.0}{25.2}$

Примечания. В каждой точке наблюдения отобрано и проанализировано 5 проб конденсата.

Наблюдается значительная дисперсия в распределении металлов в пробах, отобранных в разных частях Барун-Нарынского хвостохранилища, различия в содержаниях на отдельных участках достигают более двух математических порядков. В наиболее высоких концентрациях обнаружены такие химические элементы как марганец, железо, цинк и медь. На Барун-Нарыньском хранилище конденсат характеризуется наиболее высокими содержаниями железа, а на Зун-Нарыньском хранилище в конденсате доминирует марганец. На этом хранилище в конденсате присутствуют в значительно более высокой концентрации и другие металлы. Содержание марганца, железа и цинка достигает значений более 1 мг/л. Обнаружена высокая концентрация таких тяжелых металлов как никель, кобальт, свинец, кадмий. Несомненно, высокие концентрации этих химических элементов связаны с окислительным разложением остаточной сульфидной минерализации.

В конденсационной влаге в значительном количестве обнаруживаются литофильные химические элементы — алюминий, кремний, фосфор, стронций и литий. Очень высокая концентрация алюминия установлена в конденсационной влаге, собранной над Зун-Нарыньским хвостохранилищем. Здесь его содержание в среднем составляет 4320 мкг/л, изменяясь в интервале 2100–7400 мкг/л. А относительно более высокие содержания кремния и фосфора установлены в конденсационной влаге, собранной над Барун-Нарыньским хвостохранилищем (рис. 4). Их средние концентрации соответственно составляют 165 и 44 мкг/л, тогда как на Зун-Нарыньском хвостохранилище их концентрация составляет соответственно 148 и 23 мкг/л. Концентрация стронция и лития на Зун-Нарыньском хранилище составляет 19.5 и 19.2 мкг/л со-

ответственно, а на Барун-Нарыньском хранилище всего 9.5 и 1.9 мкг/л (Приложение, табл. 1).

В конденсационных водах обнаружены относительно высокие содержания редкоземельных элементов. Суммарное содержание лантаноидов в конденсационных водах Зун-Нарыньского хвостохранилища по пяти пробам составляет от 0.479 до 18.133 мкг/л, в среднем 7.634 мкг/л. В конденсационных водах Барун-Нарыньского хвостохранилища содержание меньше. По пятнадцати пробам среднее содержание составляет 0.401 мкг/л, при минимуме — 0.126 мкг/л и максимуме — 1.086 мкг/л. Для сравнения укажем, что суммарное содержание РЗЭ в Байкале, в пределах водосбора которого находится рассматриваемая территория, составляет 0.00585 мкг/л (Suturin et al., 2003).

Отходы добычи руд

Над отходами добычи пробы конденсата удалось собрать только в 9 случаях из 15 предпринятых попыток. Основной причиной явилась интенсивная, глубоко проникающая трещиноватость и большой размер кусков пород, на которых устанавливались конденсаторы. На породах сложенных глыбовым материалом зона аэрации составляет несколько десятков метров, пространство между отдельными кусками пород и трещины заполнено воздухом, влага присутствует в небольшом количестве. выпадающие атмосферные осадки подземным стоком удаляются за пределы мест складирования отходов. Потоки аэрозолей формируются только там, где накопились мелкие продукты выветривания пород. В табл. 3 представлен химический состав собранных проб конденсата.

Минерализация конденсационной воды изменяется от 8 до 99 мг/л, в среднем 43 мг/л.

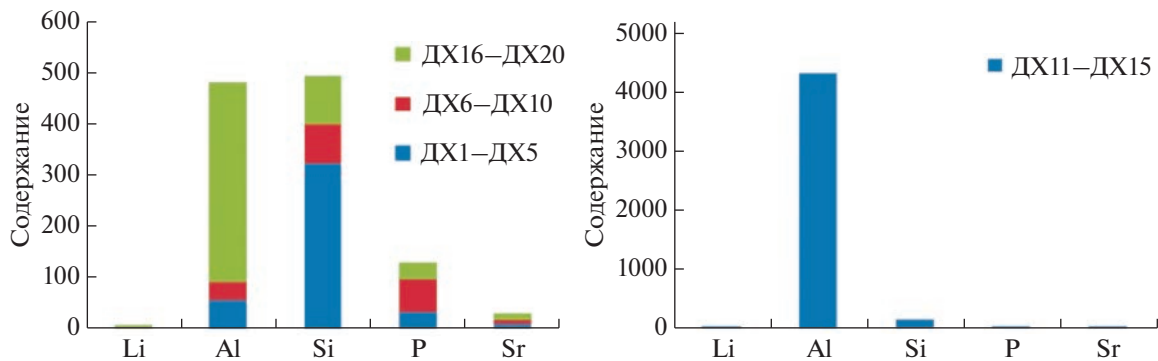


Рис. 4. Распределение содержания литофильных элементов в конденсационной влаге над хранилищами отходов переработки руд (мкг/л). Приведены средние содержания по 5 пробам.

В анионном составе обычно доминирует гидрокарбонат-ион. В отдельных пробах в относительно более высоких концентрациях обнаруживается сульфат-ион. В катионном составе чаще преобладает кальций. Вероятно, формирование химического состава этих вод, в основном, связано с выветриванием вмещающих оруденение горных пород.

Микроэлементный состав вод, в большинстве отобранных проб, формируется за счет экзогенного разрушения горных пород, содержания относительно не высокие (табл. 4; Приложение, табл. 1). Но в отдельных пробах концентрация этих элементов возрастает до значений сопоставимых с конденсатом, собранным над отходами переработки руд. В этом случае, вероятно, микроэлементы поступают в аэрозоли под воздействием разложения сульфидной минерализации.

В разных частях отходов добычи содержание тяжелых металлов изменяется в значительных пределах, что характеризует неравномерность распределения в них рудной минерализации. В целом наблюдаются относительно более высокие содержания тяжелых металлов в южной части вскрышных пород. Содержание их коррелирует с концентраци-

ей железа и серы, на основании чего можно предположить, что возрастание концентрации этих элементов связано с окислением пирита. Одновременно с увеличением концентрации указанных микроэлементов возрастает содержание алюминия, кремния, фосфора. Их концентрация в конденсате даже превышает содержания железа (рис. 5). В конденсате установлены их максимальные концентрации, достигающие соответственно 3100, 1130, 260. Содержание этих элементов в конденсате увеличивается вследствие химического выветривания пород в кислой среде. Их подвижность в газовой фазе выше, чем тяжелых металлов, миграция которых связана с разложением сульфидной минерализации.

Представленные материалы показывают, что над отходами добычи формируются аэрозоли водных растворов, в основном, малой минерализации, в которых в микроэлементном составе в большинстве случаев доминируют алюминий, фосфор, кремний, железо и цинк (рис. 5). Интенсивность поступления в атмосферу этих элементов в разных частях хранилища изменяется в значительных пределах.

Таблица 3. Макрокомпонентный состав конденсационных вод над отходами добычи, мг/л

Наименование профиля опробования, (количество проб)	pH	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Формула Курлова
ОД1–ОД5 (3)	4.6–7.6	1.06–1.68	0.24–0.63	0.42–0.69	0.75–3.4	2.91–4.14	1.24–1.89	0.8–10.5	0.015SO ₄ 39HCO ₃ 39Cl22
	6.2	1.47	0.42	0.58	1.71	3.55	1.57	4.5	Na46Mg23Ca 23
ОД6–ОД10 (4)	н.и.	1.1–10.3	0.9–1.7	0.68–3.5	2.1–9.2	5.2–19.5	1.9–12.5	6.4–36.3	0.053HCO ₃ 45SO ₄ 35Cl20
		3.9	0.83	2.0	5.7	12.0	5.1	19.7	Ca49Na30Mg12
ОД11–ОД15 (2)	н.и.	2.7–5.5	0.27–1.41	2–3.1	3.1–14.1	5.25–27.3	4.9–6.7	7.8–35.6	0.063HCO ₃ 41SO ₄ 39Cl19
		4.1	0.84	2.55	8.6	16.3	5.8	21.7	Ca58Na24

Примечания. Н.и. — не измерялась.

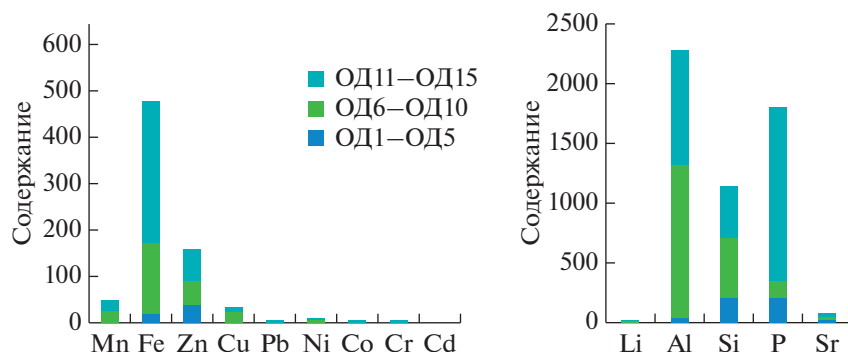


Рис. 5. Гистограмма с накоплением средних содержаний халькофильных и литофильных химических элементов в конденсационных водах над отходами добычи руд (мкг/л). Условные обозначения: ОД1–ОД5, ОД6–ОД10, ОД11–ОД15 – наименования профилей.

Снежный покров

Химический состав снежного покрова изучался дважды. В январе 2022 г. были отобраны пробы снега выпавшего накануне опробования, схема опробования приведена на рис. 1. Снег не был загрязнен пылью. На Барун-Нарынском хвостохранилище отобрано 7 проб снега, на Зун-Нарынском хвостохранилище 5 проб. Места опробования снега располагались в районе размещения пробоотборников конденсационной влаги (см. рис. 1). В табл. 5 приведен его макрокомпонентный состав.

Общая минерализация выпавшего снега на территории хвостохранилищ изменяется в интервале 0.017–0.057 г/л. Снег в пределах Барун-Нарынского хвостохранилища относительно более минерализован, чем в Зун-Нарынском хранилище. Наиболее высокая минерализация снега отмечается в пробе с наиболее высоким содержанием сульфат-иона. В Зун-Нарынском хвостохранилище отмечается относительно более высокое содержание фторид-иона. В основном, в анионном составе преобладает гидрокарбонат-ион, в катионном – кальций. В пробах снега, отобранных с поверхности песков мощностью 8–9 м, во-

ды кислые, а в пробе, отобранной на дне хранилища, откуда пески вывезены на фабрику вторичной переработки – нейтральная (СХ-4).

Содержание тяжелых металлов в снежном покрове, опробованном в разных частях хвостохранилищ, изменяется в значительном диапазоне концентраций (табл. 6). Средние содержания могут различаться более чем на порядок. В Барун-Нарынском хранилище наблюдаются наиболее высокие концентрации железа, тогда как в Зун-Нарынском хранилище преобладает концентрация марганца, здесь в снеге фиксируется комплексный ореол тяжелых металлов. Установленные закономерности указывают на то, что химический состав свежеснега формируется за счет потока аэрозолей из подстилающей толщи песков. В разных частях хвостохранилищ микроэлементный состав аэрозолей может существенно различаться (рис. 6). Наиболее интенсивный поток химических элементов в атмосфере формируется над песками, где находятся кислые поровые воды. В этом случае снег обогащается не только тяжелыми металлами, но и алюминием, литием, кремнием, фосфором. Наибольший вклад в формирование ореола загрязнения воздуха дают части хво-

Таблица 4. Средние содержания тяжелых металлов в конденсате, собранном над отходами добычи, мкг/л

Место отбора, количество определений	Mn	Fe	Zn	Cu	Pb	Ni	Co	Cr	Cd
ОД1–ОД5, (3)	3.2–10.5 5.9	19.0–52.0 34.6	48.0–123 74.6	4.1–7.1 5.3	0.56–2.1 1.08	0.9–1.7 1.2	0.06–0.13 0.09	0.28–0.49 0.38	0.09–0.44 0.22
ОД6–ОД10, (4)	24.0–71.0 37.5	159–620 307.5	66–144 96.0	17.1–61.0 31.5	0.76–2.5 1.67	3.9–29.0 10.6	0.74–7.3 3.08	0.44–1.05 0.75	0.23–1.29 0.66
ОД11–ОД15, (2)	18.2–73.0 45.6	520–720 620	58–240 149	28.0–35.0 31.5	1.28–1.34 1.31	2.2–6.7 4.4	1.1–4.0 2.6	0.7–1.55 1.12	0.4–1.19 0.79

Примечания. В табл. приведены содержания микроэлементов в пробах по профилям, обозначенным на рис. 2.

Таблица 5. Макрокомпонентный состав снега хвостохранилищ, мг/л

Хвостохранилище	pH	Na ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	HCO ₃ ⁻	Формула Курлова
Барун-Нарын (CX1–CX3)	4.5–6.4 5.7	0.14–0.33 0.24	2.19–3.28 2.63	0.28–3.28 0.32	4.0–12.0 27.6	3.78–24.86 10.98	2.84–4.25 3.5	0.21–0.34 0.26	0.6–18.9 12.6	0.043HCO ₃ 44SO ₄ 39Cl17 Ca61Mg36
Барун-Нарын (CX4)	7.1	0.3	3.65	0.31	4.0	4.11	3.97	0.37	18.3	0.036HCO ₃ 56Cl21SO ₄ 16 Mg57Ca38
Барун-Нарын (CX5–CX7)	6.1–6.6 6.4	0.06–0.56 0.23	1.22–2.43 1.9	0.1–0.9 0.4	4.0	1.15–5.1 2.85	2.8–3.97 3.39	0.1–0.12 0.11	7.3–16.5 12	0.025HCO ₃ 56Cl28SO ₄ 17 Ca53Mg42
Зун-Нарын (CX10–CX12)	6.1–6.4 6.2	0.11–0.15 0.13	1.22–1.34 1.3	0.07–0.21 0.12	3.01–4.01 3.41	2.15–3.45 3.02	2.27–3.69 3.03	0.26–0.39 0.32	6.7	0.018HCO ₃ 44Cl33SO ₄ 22 Ca57Mg38

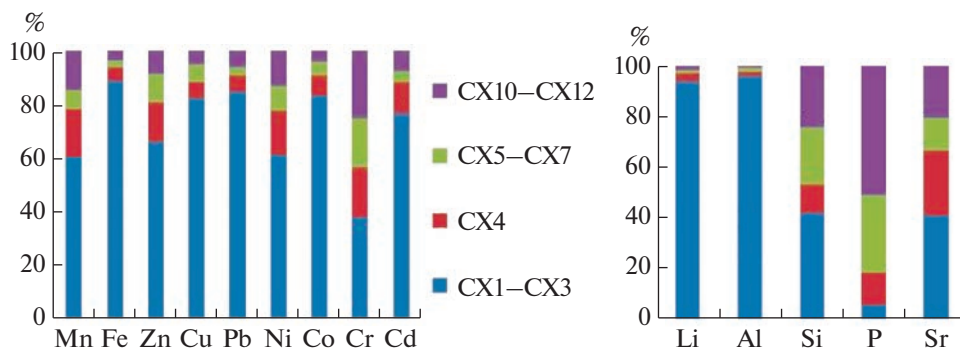


Рис. 6. Нормированное с накоплением распределение халькофильных и литофильных химических элементов в снежном покрове хранилищ переработки руд.

стохранилищ, где складированы относительно свежие порции отходов переработки руд. В этих местах в снеге обнаруживаются не только высокие содержания железа и марганца, но и свинца, меди, кобальта, кадмия, цинка (Приложение, табл. 2).

Второй раз химический состав снежного покрова изучался в конце марта. Было отобрано 22 пробы снега на площади 38 км² (рис. 3). Пробы были отобраны как вблизи хранилищ, так и на значительном удалении от них. Снежный покров в это время несет в себе интегральную нагрузку воздействия хранилищ за длительный промежуток времени.

Общая минерализация снега достигает сотен мг/л, которая коррелирует с содержанием сульфат-иона (рис. 7). Наиболее высокая минерализация снега установлена в долине реки Мыргеншено, куда стекают ручьи, дренирующие отходы добычи руд. Из-за высокой минерализации они не замерзают в холодный период года. Происходит испарение воды, с паром в атмосферу попадают растворенные вещества, которые в конечном итоге попадают в снег на окружающей террито-

рии. Второй локальный центр с высоким содержанием растворенных веществ установлен г. Закаменск. Снег, собранный в этом месте, наряду с сульфатом-ионом, содержит в своем составе значительное количество пыли. Ее количество в пробе снега достигает 23 г (рис. 8). Необходимо отметить, что городская территория ранее подвергалась заливанию при размыве насыпного хвостохранилища, располагавшегося в юго-восточной части этого поселения. Высокое содержание пыли в снеге установлено в пробах, отобранных в местах складирования отвалов штольни, отходов разработки россыпи вольфрамита, котельной и других сооружений фабрики.

Частично пыль поступает в снег в результате ветряного переноса с участков, почвенный покров которых нарушен при проведении подготовительных и горных работ. Сюда относятся многочисленные автомобильные дороги, дамбы, и прочие техногенные образования.

В основной массе проб снега установлена слабокислая и нейтральная среда (рис. 8). Значения рН меньше шести определены в снеге, отобранном в районе разгрузки рудничных вод из штоль-

Таблица 6. Содержание тяжелых металлов в снежном покрове обследованных хвостохранилищ, мкг/л

Место отбора, количество определений	Mn	Fe	Zn	Cu	Pb	Ni	Co	Cr	Cd
CX1–CX3, (3)	47–320 148	37–2700 948	23–340 134	4.7–140 51	2.6–77 28	1.4–10.3 4.6	0.28–12.3 4.54	0.48–2.5 1.2	0.19–5.2 2.0
CX4	46 ± 5%	53 ± 5%	30 ± 5%	4 ± 5%	1.9 ± 5%	1.29 ± 5%	0.39 ± 5%	0.57 ± 6.8%	0.3 ± 8.4%
CX5–CX7, (3)	12.4–21 17.2	18.4–46 31	9.5–30 21.5	0.74–9.9 3.9	0.64–1.79 1.1	0.65–0.72 0.68	0.13–0.37 0.27	0.54–0.66 0.6	0.04–0.12 0.08
CX10–CX12, (3)	27–44 36	24–54 35	8.5–27 17.6	0.84–4.7 3.2	0.53–2.9 1.94	0.92–1.21 1.03	0.096–0.38 0.22	0.57–0.88 0.8	0.05–0.34 0.19

Примечания. В точке наблюдения CX4 основная масса песка вывезена на обогатительную фабрику. В этой строке представлена концентрация химических элементов и ошибка измерения определяемых параметров.

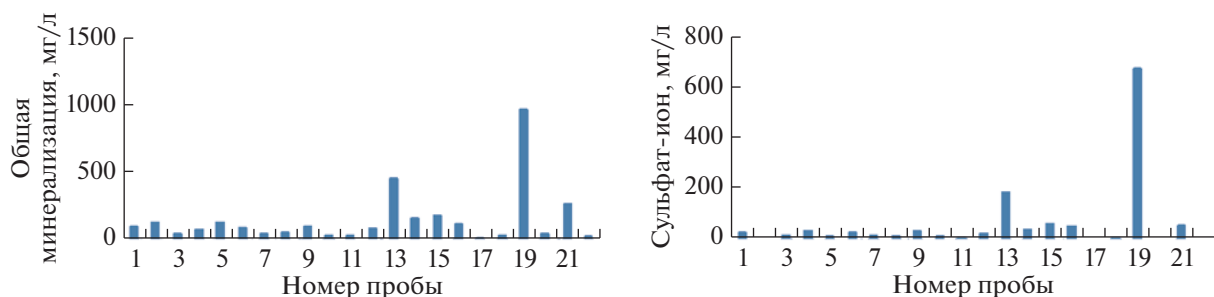


Рис. 7. Распределение общей минерализации и содержания сульфат-иона в пробах снега. Схема опробования приведена на рис. 3.

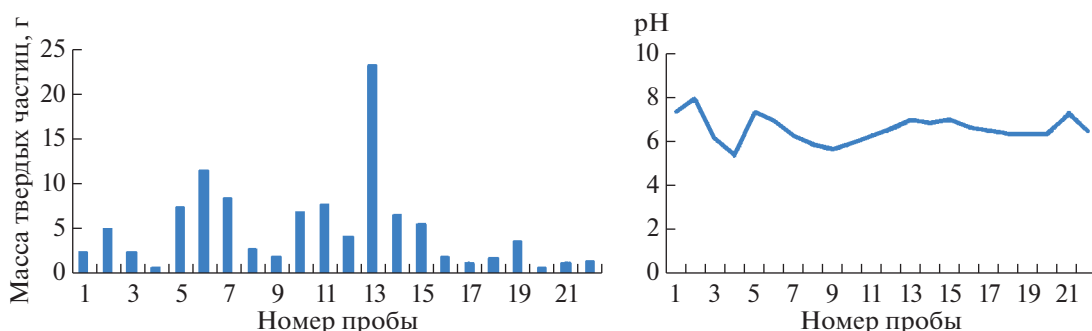


Рис. 8. Распределение содержания пыли и значений pH в снеге. Схема опробования приведена на рис. 3.

ни “Западная” и в долине ручья от обогатительной фабрики, где ранее был складирован сульфидный концентрат.

В целом, снег в обследованном районе характеризуется большим разнообразием растворенных веществ. На рис. 9 представлены диапазон изменения и средние содержания компонентов с наиболее высокими содержаниями. Данные представлены в логарифмическом масштабе. Общая минерализация снега, в среднем, составляет 148 мг/л. Среди анионов доминирует сульфат-ион, его концентрация в пробах снега, в среднем, достигает 63 мг/л. Наблюдается значительная дисперсия его концентрации, максимальное содержание превышает семь сотен мг/л, а минимальные составляют всего 2–3 мг/л. Концентрация гидрокарбонат-иона в среднем 44 мг/л. Диапазон изменения его содержания меньше, чем у сульфат-иона. Значительное количество продуктов диссоциации угольной кислоты присутствует в форме свободного углекислого газа, средняя концентрация составляет 19 мг/л, максимальная достигает 119 мг/л. Возрастание доли свободного углекислого газа обусловлено кислой средой, установившейся в снеговом покрове под воздействием переноса паров серной кислоты от хранилищ и техногенных водоемов воздушными потоками.

В снежном покрове исследуемого района обнаружены очень высокие содержания алюминия, ко-

торые в отдельных пробах достигают значений более 10 мг/л, в среднем его концентрация составляет 1 мг/л. В снеге зафиксированы также высокие содержания железа, марганца, кремния, цинка и стронция. Их средние содержания более 100 мкг/л. Концентрация фосфора, в среднем, составляет 60 мкг/л. Другие микроэлементы содержатся в снежном покрове, в среднем, в концентрации десять и менее мкг/л (Приложение, табл. 3). Диапазон изменения концентрации микроэлементов в проанализированных пробах снега составляет два-три математических порядка.

Закономерности миграции токсичных элементов от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд в атмосферу

Как показали исследования, над поверхностью хвостохранилищ формируется слой загрязненной атмосферы, в составе которого присутствуют высокие содержания растворов солей серной, угольной и других минеральных кислот. В составе конденсационной влаги установлены высокие содержания халькофильных и литофильных элементов. Высокие содержания первой группы элементов в составе потоков испаряющейся влаги вполне ожидаемы, так как в хвостах переработки вольфрам-молибденовых руд присутствуют значительные концентрации остаточной сульфид-

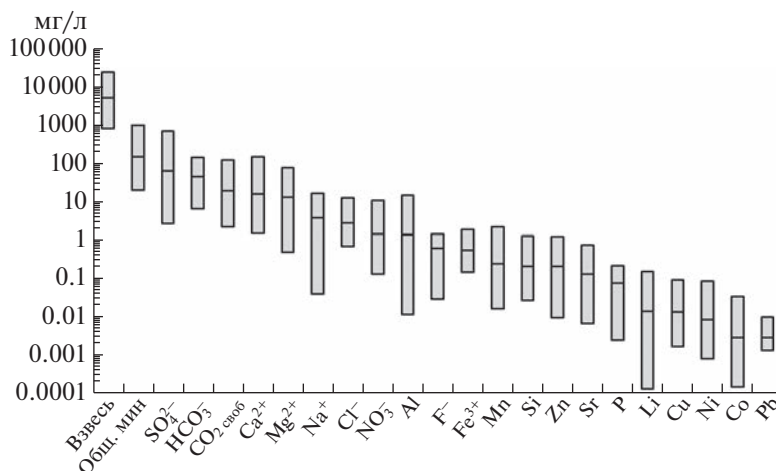
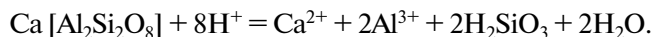


Рис. 9. Содержание компонентов в снежном покрове территории, подверженной воздействию хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд. Условные обозначения: столбиками показан диапазон изменения концентрации компонента, чертой внутри столбика указаны средние содержания.

ной минерализации. Пирит является наиболее распространенным минералом среди сульфидов, его содержание в хвостах переработки руд может достигать 3.1 вес. %. Известно, что при его окислении образуется серная кислота (Плюснин, Гунин, 2001; Смирнова, Плюснин, 2013). При длительном хранении в толще песков сформировалась кислая среда (рН 1.8–3.4), в растворе накопились разнообразные продукты разложения сульфидной минерализации и горных пород. Так в водной вытяжке песков общая минерализация растворов достигает 3.5 г/л, содержание сульфат-иона — 2.1 г/л, железа — 160 мг/л, цинка — 11 мг/л (Плюснин, Дабаева, 2018). В кислой среде происходит активное разложение полевого шпата, кальцита, флюорита, апатита. В поровых водах с помощью лизиметров нами установлены аномально высокие концентрации алюминия — до 94.7 мг/л; фтора — до 21.7 мг/л; кремния — до 12.5 мг/л. Эти концентрированные растворы по капиллярам могут перемещаться к поверхности земли даже в зимнее время (Птицын, 1998). При испарении влаги часть из них высаживается на поверхности в виде разнообразных экзогенных минералов. Другая часть остается в составе пара, который постепенно рассеивается ветром, в результате чего формируется ореол загрязнения воздушной среды над хранилищами отходов и окружающей их территории.

В составе пара обнаруживается высокая концентрация алюминия. Его необычайно высокая миграционная способность в воздушной среде, по нашему мнению, связана с тем, что он накапливается до очень высоких концентраций в поровых водах. Его концентрирование происходит за счет интенсификации разложения полевого шпата

в кислой среде. Реакцию разложения можно представить на примере анортита следующей схемой:



В процессе разложения полевого шпата в поровых водах, совместно с алюминием, возрастает концентрация кремния и кальция, в результате содержание этих элементов в конденсационных водах увеличивается.

Высокая концентрация марганца в потоках аэрозолей, связана с тем, что для вольфрамовых месторождений характерно присутствие этого элемента в виде минерала родохрозит, который встречается в виде жил. В кислой среде хвостохранилищ происходит разложение этого минерала, и марганец переходит в раствор. По такому же механизму формируется и некоторая часть железа в поровом растворе, так как в руде изначально присутствует сидерит.

Известно, что геохимические аномалии в снежном покрове отражают состояние атмосферы, суммируя воздействие природных и техногенных факторов (Трофимов и др., 2006). Снежный покров отражает контуры аэрогенного загрязнения за период своего существования и позволяет судить о динамике происходящих процессов. Химический состав талого снега формируется в результате поступления с осадками различных химических элементов, поглощения снежным покровом газов, водорастворимых аэрозолей и взаимодействия со снеговым покровом твердых частиц, оседающих из атмосферы. При этом, если количество выпадающего со снегом твердого осадка характеризует загрязненность территории, то фильтрат талого снега отражает степень загрязнения воздушного бассейна наиболее растворимыми формами элементов (Белозерцева, 1999). Загрязняющие вещества

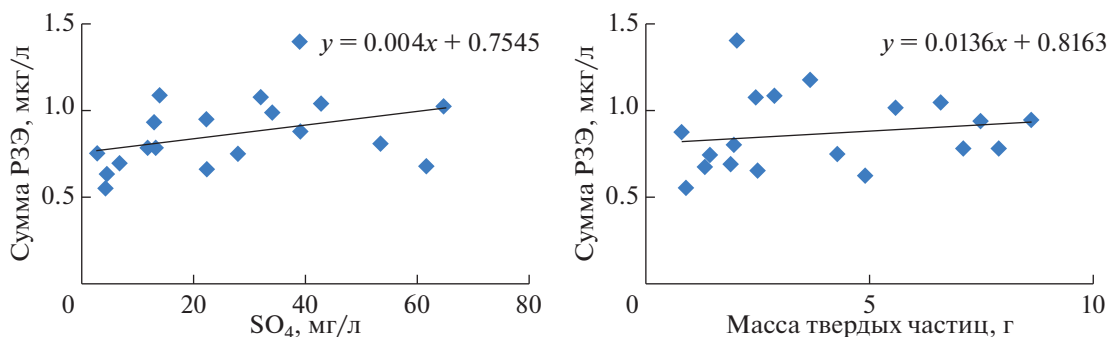


Рис. 10. Зависимость содержания РЗЭ в талой воде от количества сульфат-иона и взвешенных веществ.

до начала весеннего миграционного цикла остаются законсервированными в снежном покрове, поэтому химический анализ снега позволяет предсказать состав будущих мигрантов в составе поверхностных вод.

Вероятно, значительная часть компонентов талых вод поступает за счет десорбции компонентов сорбированных на взвеси. Как показали наши исследования, сорбция микроэлементов происходит при взаимодействии поровых растворов с вновь образующимися твердыми фазами. Это наглядно проявляется при сравнении конденсационных вод Барун-Нарынского и Зун-Нарынского хвостохранилищ. В первом хранилище за длительный период времени сформировались экзогенные твердые фазы с активной поверхностью. Конденсационные воды здесь содержат значительно меньше микроэлементов, так как они удаляются за счет сорбции твердыми продуктами выветривания, которые присутствуют в песках. Вторичная переработка вольфрам содержащих песков проводится с использованием большого количества воды. В технологическом процессе тонкие взвеси вымываются из песков, поэтому в поровых водах Зун-Нарынского хвостохранилища сорбционные процессы проявляются слабо и микроэлементы присутствуют здесь в более высоких количествах.

Повышенные содержания РЗЭ в снежном покрове могут быть связаны с потоком аэрозолей из поровых вод и воздействием на химический состав процессов десорбции. На это указывают установленные корреляционные зависимости между концентрацией редкоземельных элементов и содержанием сульфатов, взвешенных веществ (рис. 10). Вероятно, поведение других микроэлементов в снежном покрове также подчиняется воздействию этих факторов.

Установленные закономерности поведения микроэлементов при формировании загрязнения атмосферы подтверждаются результатами обработки полученной информации факторным анализом. Были сформированы выборки результатов

анализа проб конденсата и снежного покрова, отобранного в марте. В выборку конденсата было включено 29 проб, в выборку снега 22 пробы. В обоих случаях пробы были проанализированы по 72 параметрам. Для расчетов использован метод главных компонент, реализованный в пакете программ Statistica. Для определения количества выделяемых компонент применялся критерий “каменистой осыпи”. Использовался ортогональный метод вращения варимакс, значимыми признавались корреляции при нагрузках более 0.7. Результаты факторного анализа представлены в табл. 7 и 8.

В конденсационных водах выделяется три группы элементов, находящихся в корреляционной зависимости. Эти ассоциации формируются при протекании трех процессов протекающих в поровых водах, которые приводят к растворению разных химических элементов. Формирование ассоциаций элементов, вероятно, связано с неоднородностью распределения рудной минерализации, карбонатных пород, алюмосиликатных и силикатных пород, заключенных в хранилищах отходов добычи и переработки руд. В силу этого микрокомпонентный состав поровых вод в различных местах хранилищ формируется под воздействием разных процессов, соответственно образуются разнообразные ассоциации с различной концентрацией химических элементов. Сформировавшиеся ассоциации химических элементов поровых вод наследуются аэрозольными потоками, выделяющимися в атмосферу, что и зафиксировано в конденсационных водах.

В снежном покрове установившиеся ассоциации элементов нарушаются, так как система усложняется. В снег попадает пыль, начинают протекать процессы сорбции, десорбции с участием твердой фазы. Меняется газовый состав, добавляются химические элементы из других источников загрязнения. В результате вымораживания возрастает минерализация растворов и происходит кристаллизация труднорастворимых соединений. Результаты исследования поведения

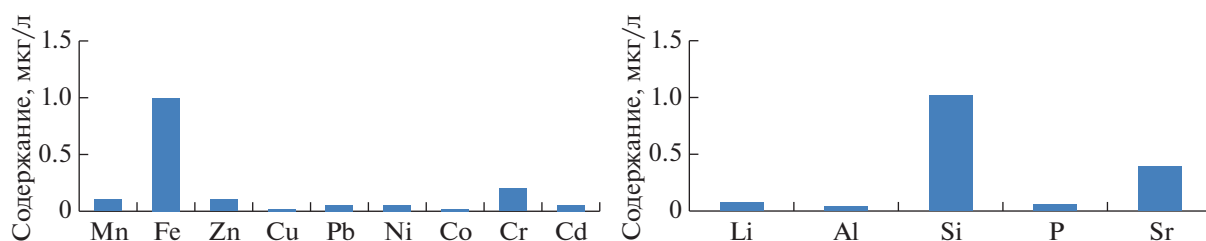


Рис. 11. Предельно допустимые концентрации микроэлементов в водоемах рыбохозяйственного назначения, мг/л (Приказ..., 2016).

микроэлементного состава снежного покрова методом факторного анализа приведены в табл. 8.

В снежном покрове в первом факторе отражается воздействие хранилищ отходов, которые в конденсационных водах проявляются в первом и втором факторах. Почти все химические элементы, которые составляли те ассоциации, проявляются здесь. Только в этом факторе нет алюминия, железа, кальция, и кремния. Эти элементы, вероятно, в снежном покрове образуют твердую фазу, первые два в виде гидроксидов, кальций кристаллизуется в виде кальцита, а кремний, вероятно, в виде глины. При таянии снега происходит частичное растворение гидроксида алюминия и десорбция некоторых лантаноидов, поэтому выделяется вторая ассоциация элементов. В третьем факторе, возможно, проявляется десорбция эле-

ментов с поверхности и частичное растворение пыли, которой в образцах снега очень много. В четвертом факторе, вероятно, проявляется антропогенное и техногенное загрязнение снежного покрова, так как пробы снега отбирались в пределах города.

Накопившиеся в снежном покрове токсичные элементы весной вместе с талыми водами попадают в реку Джиду, затем в реку Селенгу и озеро Байкал, которые являются водоемами рыбохозяйственного назначения. Несомненно, эти потоки воды наносят вред биоте этих водоемов. На рис. 11 приведены предельно допустимые концентрации, установленные для вод этого типа водоемов.

Сравнение концентраций рассматриваемых элементов в талых водах с предельно допустимы-

Таблица 7. Ассоциации элементов и причина выделения факторов в конденсационных водах

№ фактора	Ассоциация элементов	Возможная причина выделения	Собственное значение фактора	Вес фактора, %
1	Li, Be, Mg, Al, S, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Y, Rh, Cd, REE, U	Поток аэрозолей из песков, где происходит окисление сульфидной минерализации, растворение кислыми водами карбонатов, алюмосиликатов.	30.2	42
2	B, Na, Si, P, Cl, Sr, I, Au	Воздействие выветривания силикатных пород	12.9	18
3	Ti, Cr, Nb, Bi, Th	Влияние кислотного разрушения устойчивых к выветриванию минералов (сфен, хромшпинелиды, торит и др.)	8.6	12

Таблица 8. Ассоциации элементов в снежном покрове

№ фактора	Ассоциация элементов	Возможная причина выделения	Собственное значение фактора	Вес фактора, %
1	Li, Be, B, Na, Mg, S, Ca, Mn, Co, Ni, Sr, Ru, Rh, Cd, I, Cs, Re, U	Воздействие хвостохранилищ, где протекают окислительные процессы	18.6	26
2	Al, La, Ce, Nd, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu	Десорбция из взвеси гидроксида алюминия при таянии снега	13.8	19
3	Ti, V, Ga, Ge, Nb, Mo, Sb	Воздействие пыли	10.9	15
4	Cl, K, As, Au, Pb	Техногенное загрязнение снега	8.3	12

ми концентрациями в водоемах, показывают, что превышение последних может достигать 1–2 математических порядка. Таким образом, атмосферный перенос токсичных элементов оказывает негативное воздействие не только на состояние среды на окружающей территории, но и может воздействовать на рыбные ресурсы водотоков и водоемов, находящихся в регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что над хранилищами отходов горнодобывающих предприятий образуется постоянно существующий ореол загрязнения атмосферы. Главными факторами, определяющими миграцию различных токсичных химических элементов в воздушной среде, являются: близкое к поверхности залегание грунтовых вод, которое определяет присутствие капиллярной каймы поровых вод вблизи поверхности и соответственно выделение аэрозолей минерализованных вод в атмосферу; окислительное разрушение сульфидной минерализации; кислотное разложение пород. Экспериментальными исследованиями установлен качественный и количественный состав потоков аэрозолей. Наиболее высокими содержаниями в потоках характеризуются сульфат-ион и такие микроэлементы как алюминий, железо, марганец, цинк. Пылевое и аэрозольное загрязнение атмосферы в горнорудных районах не коррелируют друг с другом. Загрязнение атмосферы потоками аэрозолей часто происходит в результате процессов разложения в кислой среде различных минералов, накопленных на хвостохранилищах. Пылевое загрязнение атмосферы может проявляться в микроэлементном составе талых вод, так как при таянии снега происходит десорбция элементов с поверхности взвешенных частиц.

Загрязнение атмосферы отходами горнодобывающих предприятий оказывает влияние на экологическое состояние природной среды не только на окружающей территории, но и распространяется водными потоками далеко за пределы сформировавшихся ореолов загрязнения и может наносить вред рыбным ресурсам региона.

Авторы выражают благодарность научному редактору статьи М.И. Дину и рецензентам за конструктивные замечания, которые позволили улучшить ее содержание.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту АААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока и проекта НОЦ “Байкал”. Частично финансирование было осуществлено из бюджета Республики Бурятия по проекту № 533.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аэрозоль и климат* (1991) Ред. К.Я. Кондратьева. Л., 541 с.
- Бортникова. С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. (2006) Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Академическое изд-во “ГЕО”, 169 с.
- Бортникова и др. (2020) Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область). *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами*. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 201–203.
- Дорошкевич С.Г., Смирнова О.К., Штарева А.В. (2017) Оценка загрязненности территории, дренируемой рудничными водами сульфидно-вольфрамового месторождения (Западное Забайкалье). *Экология и промышленность России*. 21 (6), 54–57.
- Курлов М.Г. (1928) Классификация Сибирских целебных минеральных вод. Томск: Физиотерапевтический институт в Томске, 73 с.
- Маркович Т.И., Птицын А.Б. (1998) Неконтролируемое кислотное выщелачивание тяжелых металлов из сульфидных отвалов. *Химия в интересах устойчивого развития*. 5, 349–354.
- Методика выполнения измерений массовой концентрации гидрокарбонат-, хлорид-, нитрит-, нитрат-, сульфат- и фосфат-анионов в питьевых, природных и очищенных сточных водах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии, разработанная Лимнологическим институтом Сибирского отделения Российской академии наук, аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563-96, ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Свидетельство № 10-08 от 21 февраля 2008 г., порядковый номер регистрации в Федеральном реестре методик выполнения измерений, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора 04416, регистрационный код МВИ по Федеральному реестру ФР.1.31.2008.04416.
- Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Приложение к приказу Минсельхоза России от 13 декабря 2016 г. № 552 (с изменениями на 10 марта 2020 г.). <https://docs.cntd.ru/>
- Плюснин А.М., Гунин В.И. (2001) Природные гидрогеологические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на примере Забайкалья). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 137 с.
- Плюснин А.М., Дабаева В.В. (2018) Редкоземельные элементы в рудничных и поровых водах хвостохранилищ Джидинского и Бом-Горхонского ГОКов. *Подземные воды востока России (Материалы XXII Совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока)*. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 384–388.
- Плюснин А.М., Дабаева В.В., Жамбалова Д.И., Перязева Е.Г., Ташлыков В.С. (2020) Редкие земли в поверхностных и подземных водах на территории размещения вольфрамдобывающего производства Забайкалья. *Геохимия*, 65(7), 711–728.
- Plyusnin A.M., Dabaeva V.V., Zhambalova D.I., Peryazeva E.G., Tashlykov V.S. (2020) Rare Earth Elements in Sur-

face and Groundwaters in the Area of a Tungsten-Mining Enterprise in Transbaikalia. *Geochem. Int.*, **58**(7), 850-865.

Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения” (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203)

Птицын А.Б. (1998) Особые свойства пленочных растворов и их роль в геохимических процессах. *Геохимия*. (12), 1291-1297.

Птицын А.Б., Абрамова В.А., Маркович Т.И. (2009) Специфика криогеохимических процессов в зоне техногенеза. *Минералогия техногенеза*. **10**, 215-217.

Сихинбаева Ж.С., Дайрабаева А.Ж. (2013) Изучение загрязнения окружающей среды аэрозолями. *Международный журнал экспериментального образования*. **11**, 241-243.

Смирнова О.К., Плюснин А.М. (2013) Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 181 с.

Смирнова О.К., Плюснин А.М., Хажеева З.И. (2013) Современное минералообразование в местах складирования отходов горнорудной промышленности. *Отчетственная геология*. **3**, 104-111.

Чебыкин Е.П., Сорокикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А. (2012). Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам. *Химия в интересах устойчивого развития*. **20**(5), 613-631.

Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N., Semenov A.R., Lozhkin V.I., Petrov L.L. (2003) Preparation and assessment of a candidate reference sample of lake Baikal deep water. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. **58**(2), 277-288.

Zychowski K.E., Wheeler A., Sanchez B., Harmon M., Steadman Tyler C.R., Herbert G., Lucas S.N., Ali A.-M., Avasarala S., Kunda N., Robinson P., Muttill P., Cerrato J.M., Bleske B., Smirnova O., Campen M.J. (2019) Toxic Effects of Particulate Matter Derived from Dust Samples Near the Dzhidinski Ore Processing Mill, Eastern Siberia, Russia. *Cardiovascular Toxicology*. **19**(5), 401-411.