ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Экспериментальное исследование загрязнения приземной атмосферы металлами при разработке Озерного полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье)

А.М.Плюснин, А.В.Украинцев✉, М.К.Чернявский

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

Как цитировать эту статью: Плюснин А.М., Украинцев А.В., Чернявский М.К. Экспериментальное исследование загрязнения приземной атмосферы металлами при разработке Озерного полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье) // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 115-124. EDN JNTOLH

Аннотация

Отходы добычи и переработки руд оказывают негативное влияние не только на поверхностные, подземные воды, почвы, но и на состояние приземной атмосферы. В хорошо проницаемых отложениях хранилищ отходов в результате выветривания руд и вмещающих оруденение пород формируются высокоминерализованные воды, содержащие металлы. Под их воздействием над хранилищами образуются потоки жидких аэрозолей, условия формирования и химический состав которых еще плохо изучены. Цель работы – установление качественного и количественного состава токсичных металлов, поступающих в составе аэрозолей в приземную атмосферу хранилища окисленных руд и вскрышных пород, складированных при разработке Озерного полиметаллического месторождения. Поставлены задачи выявления механизма образования потока аэрозолей из зоны аэрации хранилищ, разработки методики отбора пробы аэрозолей путем его конденсирования и сбор необходимого для анализа количества конденсата. Отобранные образцы конденсата проанализированы методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce по сертифицированной методике. Установлено, что общая минерализация конденсационных вод достигает значений 110-130 мг/дм^3. Содержание токсичных элементов (ртуть, свинец, цинк, медь) в несколько раз превышает концентрацию, установленную в поверхностных водах этого района. В снежном покрове на территории, прилегающей к ГОКу, в аномально высоких концентрациях, превышающих ПДК рыбохозяйственного назначения, обнаружены марганец, цинк, медь, ртуть, их поступление в снежный покров связано с испарением с поверхности складированных отходов и переносом загрязняющих веществ воздушными потоками. В работе показано, что от склада окисленных руд и вскрышных пород в атмосферу поступают жидкие аэрозоли, содержащие высокие концентрации токсичных химических элементов. Для защиты природной среды на предприятии необходимы мероприятия по изоляции складированных отходов разработки месторождения от агентов выветривания и поступления аэрозолей в атмосферу, а также использование средств индивидуальной защиты для персонала, работающего с отходами добычи и переработки руд.

Ключевые слова

хранилища отходов добычи руд; токсичные металлы; аэрозоль; загрязнение; атмосфера; снежный покров; техника безопасности

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 24-27-20077.

Поступила: 17.03.2025 ***Принята: 09.12.2025*** ***Онлайн: 21.04.2026*** ***Опубликована: 12.05.2026***

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых, формирование хвостохранилищ оказывает многоплановое негативное воздействие на окружающую среду и работающий персонал [1]. В литературе большое внимание уделяется образованию пыли [2]. Негативное воздействие на природу происходит в период разработки [3], после завершения работы предприятия [4] и при авариях [5, 6]. В районе работ постепенно возрастает концентрация металлов в ландшафтах [7]. Это обусловлено складированием большого количества отходов добычи и переработки руд, в составе которых остается рудное вещество и тонкая пыль [8, 9].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Особенно интенсивное загрязнение происходит при открытом способе добычи полезных ископаемых. В этом случае при разработке месторождений на земной поверхности формируются отвалы вскрышных пород на огромной площади [10]. Начинают интенсивно протекать процессы, не свойственные природе [11]. Так как породы издроблены при добыче, при хранении они начинают интенсивно измельчаться агентами выветривания [12] и активно взаимодействуют с образующимися кислотами [13] и микроорганизмами [14]. В значительной степени меняются формы нахождения элементов [15]. В результате у находящихся в их составе токсичных элементов появляется способность мигрировать в поверхностные, подземные воды и атмосферу [16, 17].

Миграция токсичных химических элементов в поверхностных и подземных водах довольно хорошо изучена [18, 19], показано, что из растворов осаждаются гипергенные минералы, содержащие тяжелые металлы [20]. Этого нельзя сказать о загрязнении атмосферы. Обычно в исследованиях основное внимание обращается на образование газов, пыли [21], их влияние на биосферу и человека [22, 23]. Исследованию потоков жидких аэрозолей, содержащих металлы, над горно-рудными районами не уделяется достаточного внимания. Можно отметить работы по экспериментальному исследованию путем принудительной прокачки воздуха над отвалами пород через барботер с деионизированной водой, показавшие превышение фоновых концентраций по Sb, As, Mo, Sn, Al в 20 раз; Cu, Pb, Ni, Ba, Ti, Y в 10 раз и геохимическому исследованию снежного покрова [24-26].

В городах проводятся работы по определению аэрозолей в воздухе, особенно в зимний период, но химический состав жидких аэрозолей не удается определить из-за неразработанности методик их концентрирования [26]. Исследования твердых аэрозолей более продвинуты, показана зависимость их токсичности от размера частиц [2]. Показано влияние загрязнения атмосферы на здоровье работающих на предприятии людей [27], населения, проживающего вблизи рудников [28] и на окружающей территории [29]. Выявлены виды заболеваемости и механизм воздействия на организм человека [30, 31]. Сделан вывод, что перенос токсичных веществ в воздухе необходимо учитывать при экологической реабилитации отвалов горных пород [32].

В представленной работе впервые рассмотрена миграция токсичных металлов в составе жидких аэрозолей на действующем горно-добывающем предприятии. Целью данной работы было установление качественного и количественного состава загрязняющих веществ, поступающих в приземную атмосферу под воздействием отходов добычи руд Озерного полиметаллического месторождения.

Методология и методика исследования

Загрязнение приземной атмосферы в горно-рудных районах связано с геолого-геохимическими процессами, протекающими в зоне аэрации. Извлеченные из недр горные породы издроблены в технологическом процессе. В результате этого в них активизировалось взаимодействие в системе вода-порода. Исследование химического состава подземных вод в местах хранения отходов добычи и переработки руд проводится давно, этому посвящено большое количество публикаций. Показано, что поровое пространство в нижней части хранилищ отходов добычи и переработки руд заполнено высокоминерализованными водами и газами [33]. В зоне аэрации хранилищ отходов минерализованные растворы могут находиться в виде пара, в форме физически и химически связанной воды и в виде капиллярной воды. Все формы существования находятся в динамическом равновесии с грунтовыми водами. Парообразная вода летом передвигается сверху вниз, так как упругость паров с глубиной уменьшается. Она конденсируется в нижней части зоны аэрации, где не действует тепловое воздействие солнечной энергии. Зимой пар, напротив, поднимается к поверхности от горизонта грунтовых вод, так как упругость паров наверху уменьшается при замерзании воды [34]. Капиллярная вода в виде каймы поднимается от грунтовых вод к поверхности за счет сил поверхностного натяжения. Высота поднятия капиллярной воды зависит от размера пор в горной породе, чем меньше радиус капилляра, тем выше поднимается капиллярная кайма от уровня грунтовых вод. Если капиллярная кайма достигает поверхности, происходит испарение воды в атмосферу. Расход капиллярной воды на испарение восстанавливается путем притока ее из водоносного горизонта. При увеличении минерализации воды возрастает высота поднятия капиллярной каймы, т.е. высокоминерализованные растворы, содержащие тяжелые металлы, могут подниматься к поверхности с большей глубины.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Высота капиллярной каймы установлена для некоторых осадочных пород, различающихся размером частиц [35]: песок среднезернистый – 0,15-0,35; песок мелкий – 0,35-1,0; супесь – 1,0-1,5; суглинок легкий – 1,5-2,0; суглинок средний – 2,0-3,0; суглинок тяжелый – 3,0-4,0; глина – 4,0-5,0 м. Высота капиллярной каймы в приведенных породах различается более чем на математический порядок. На горно-добывающих предприятиях отходы добычи (вскрышные породы) представлены более крупными частицами, чем отходы переработки руд, которые истираются до размерности сотых и тысячных долей миллиметра. Поэтому в хранилищах отходов переработки руд за счет сил поверхностного натяжения растворы могут поступать с большей глубины. Соответственно, это проявляется в увеличении минерализации воды и возможности поступления токсичных веществ в зимний период.

Для пресных вод установлено, что минерализация и химический состав воды зоны аэрации близки составу грунтовых вод. Для минерализованных вод установлен значительный рост минерализации в поровых водах по сравнению с гравитационными водами. Благодаря наличию в воде водородных связей в расположении ее молекул наблюдается высокая степень упорядоченности, которая сохраняется в парообразном состоянии. Пар представляет собой не отдельную молекулу воды, а ассоциацию в несколько десятков тысяч молекул, поэтому при испарении воды частицы пара уносят с собой и растворенные в нем вещества.

Исследования химического состава приземной атмосферы проводились в полевых и лабораторных условиях. В полевых условиях в летний период (15-18 июля 2023 г.) проводились эксперименты по сбору конденсата в местах хранения отходов добычи руд с целью выявления интенсивности потоков аэрозольного загрязнения. В весенний период (10-14 марта 2024 г.) изучался химический состав снежного покрова окружающей территории.

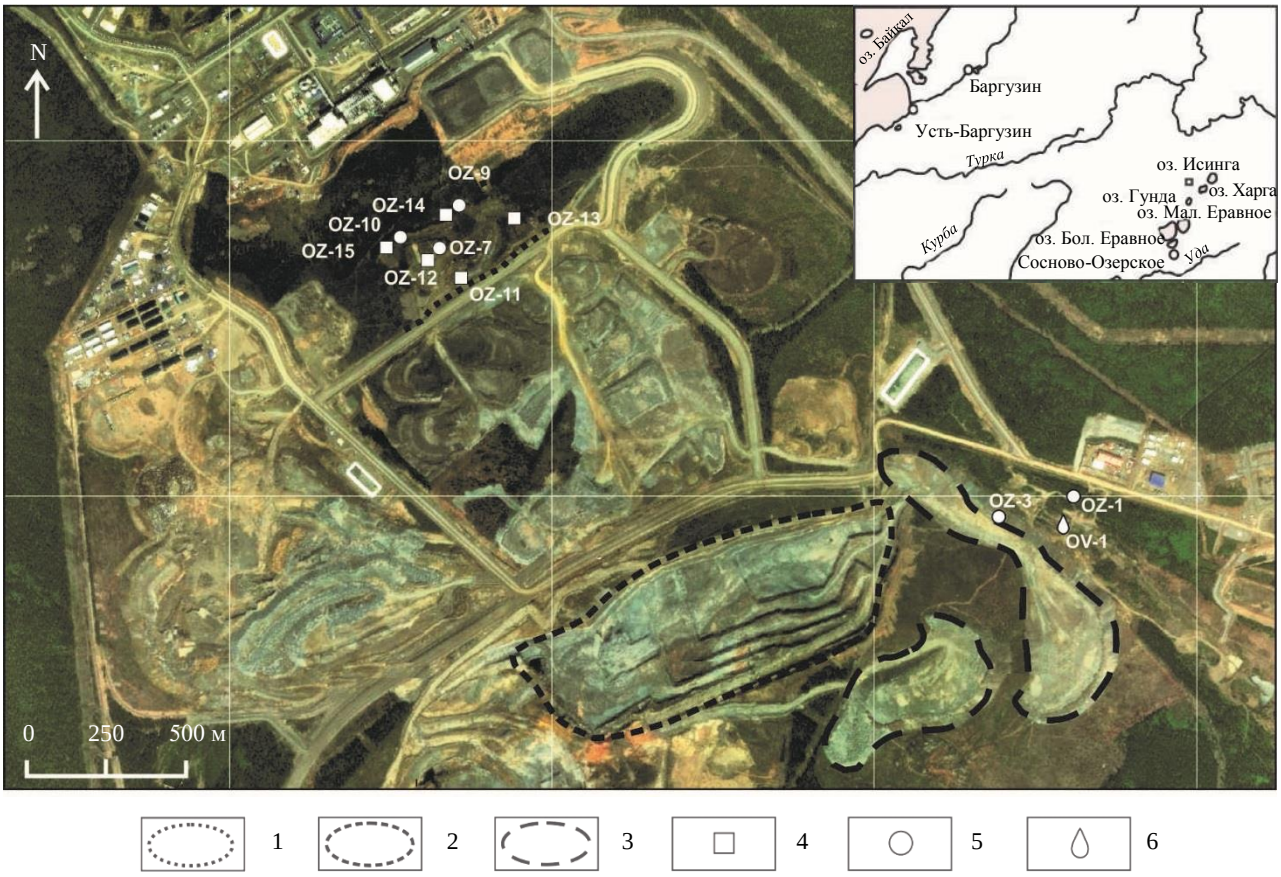


Рис.1. Обзорная карта и спутниковый снимок территории Озерного ГОКа с местами опробования конденсационных вод и сбора атмосферных осадков (Google Earth, снимок 2023 г.)

1 – склад окисленных руд; 2 – карьер; 3 – хранилища отвалов вскрышных пород; 4 – места сбора проб атмосферных осадков; 5 – места опробования конденсационных вод; 6 – место опробования временного водотока

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Для исследования химического состава воды, испаряющейся с поверхности хранилищ отходов, использована методика конденсирования паров. Площадь поверхности, с которой производился сбор конденсата, составляла 1 м^2. Схема опробования конденсата в отходах добычи руд показана на рис.1. Для увеличения достоверности полученных результатов в каждом пункте наблюдения одновременно устанавливалось пять сборников конденсата. Расстояние между сборниками составляло 20 м, такой способ размещения конденсаторов позволяет охарактеризовать потоки аэрозолей с большой площади и нивелировать неоднородности в строении песков, связанные с технологией складирования отходов. Сборники конденсата устанавливались 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 20 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 поверхности полиэтиленовой пленки. Образующиеся капли стекают в контейнер, который расположен под пленкой. Накопившийся в контейнере конденсат фильтровался через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и подкислялся для проведения химического анализа.

Для выявления регионального фона содержания микроэлементов в водных объектах на окружающей ГОК территории было проведено опробование ручья Гундуй-Холой, который стекает с хребта Зусы в районе расположения месторождения и впадает в оз. Гунда, проба воды была отобрана в его приустьевой части (рис.2). Для установления концентрации микроэлементов в конденсационной влаге на территории, не затронутой горно-добывающим производством, были исследованы две пробы конденсата в долине р. Джида.

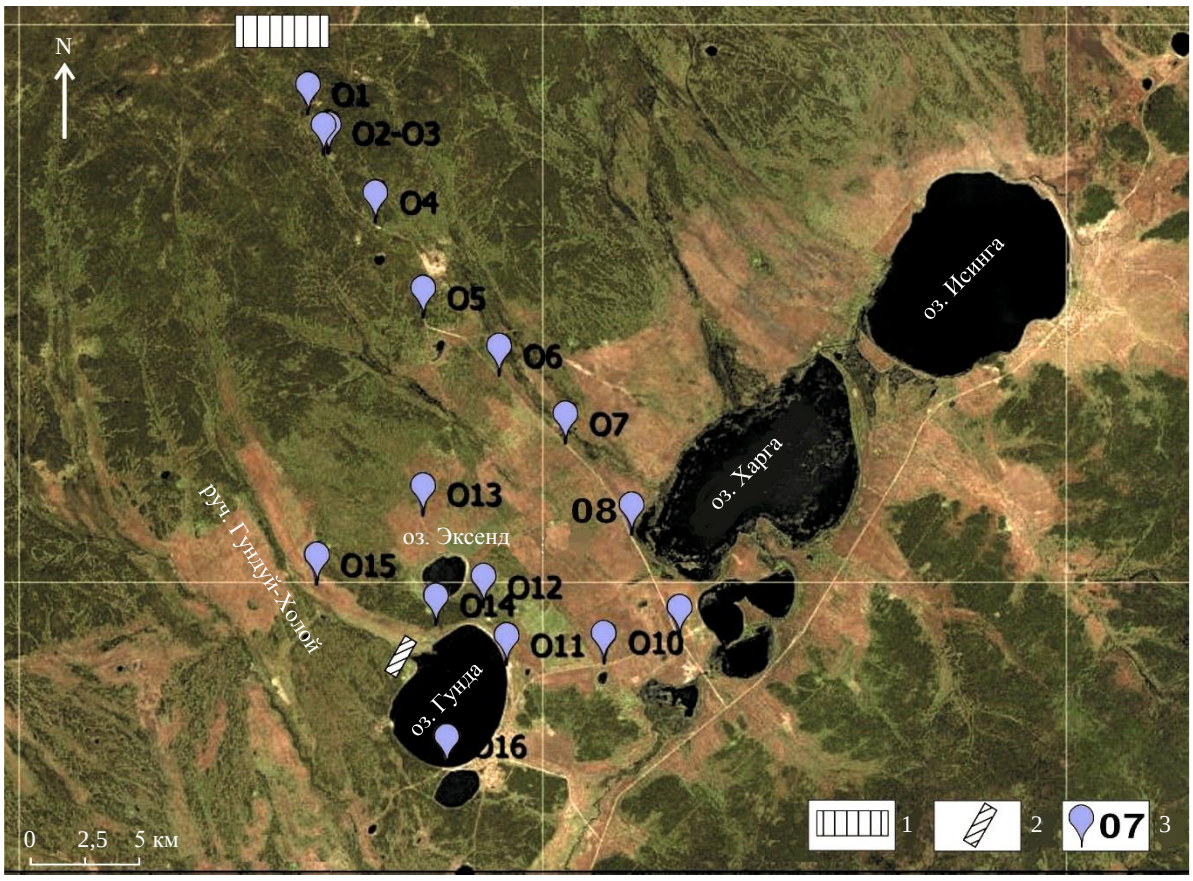


Рис.2. Топографическая карта района исследований с точками опробования снежного покрова
1 – объекты инфраструктуры ГОКа; 2 – фоновый створ опробования ручья; 3 – места отбора проб снега

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Опробование снежного покрова проведено за пределами лицензионного участка предприятия, с учетом розы ветров профиля заложены в юго-восточном направлении, в сторону Еравнинской котловины. Отобрано 16 проб снега. Методика отбора проб, пробоподготовки и анализа снега подробно описаны в [36]. Проба снега отбиралась в полиэтиленовый пакет. Снег плавился при комнатной температуре, для отделения взвешенных веществ вода фильтровалась через мембранный фильтр и готовилась для проведения анализа на содержание макро- и микроэлементного состава.

Анализ микроэлементного состава выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce в Лимнологическом институте СО РАН согласно методике, описанной в [37]. Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, USA), а также растворы катионов (Fe, Hg) и анионов (P), приготовленные смешением одноэлементных ИСП-МС стандартных растворов компании Inorganic Ventures (США): Fe (MSFE-100PPM), Hg (MSHGN-10PPM), P (MSP-100PPM). Металлы в стандартных растворах присутствовали в азотнокислой среде, анионы в форме ортофосфорной кислоты. Методика анализа позволяет определять в пробах воды одновременно 72 химических элемента, включая щелочные, щелочноземельные, редкие, редкоземельные, благородные, радиоактивные.

Физико-географическая характеристика района исследования, геологическое строение и технология разработки Озерного месторождения

Месторождение Озерное расположено в Западном Забайкалье на Витимском плоскогорье, на границе тайги и обширных плоских котловин, занятых Еравнинскими озерами. Абсолютные отметки высот на месторождении от 1100 до 1335 м, относительные превышения составляют 250-300 м. Гидросеть развита слабо, северо-восточнее месторождения протекает р. Витим с правым притоком – р. Заза. На юго-востоке расположены озера Большое Еравное, Малое Еравное, Сосновое, Гунда, Харга, Исинга и другие мелкие озера.

Климат резко континентальный, с сухой продолжительной зимой и коротким жарким летом. Зимой погоду определяет сибирский антициклон с преобладанием малооблачной погоды со слабыми ветрами и небольшим количеством осадков. В теплое время года усиливается циклоническая деятельность с заметным увлажнением. Годовая сумма осадков по данным метеостанции Усть-Заза колеблется от 170 до 387 мм. В теплый период (май-сентябрь) выпадает до 90 % годовой суммы осадков. Устойчивый снежный покров образуется к началу ноября, его максимальная величина 29 см, разрушаться начинает в марте-апреле. Многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение, мощность в водораздельной части 100-150 м, на склонах северной экспозиции 120-150 м, в Еравнинской и Зазинской впадинах мощность 15-120 м. Под крупными озерами имеются сквозные талики. На склонах, в русловых частях рек и впадинах, где имеются тектонические нарушения, формируются несквозные талики. Температура многолетнемерзлых пород по данным термокаротажа скважин на месторождении Озерное от –0,5 до –2,5 °С.

Озерное месторождение полиметаллов открыто в 1961 г. Руды залегают в вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах: туфах кислого и среднего состава, известковистых и углистых туффитах, известняковых брекчиях на туфовом цементе, известняках. Главные рудные минералы представлены пиритом и сфалеритом, в меньшей степени распространен галенит. Второстепенные минералы – магнетит, гематит, арсенопирит, халькопирит, блеклые руды, минералы серебра. В рудах присутствуют элементы-примеси, среди них мышьяк, сурьма, германий, таллий. Характерно тонкое срастание сульфидов между собой и малая крупность зерен (0,01-0,05 мм). Состав руд свинцово-цинковый при почти полном отсутствии меди, соотношение Pb : Zn : Cu равно 1 : 6 : 0,05. Среди нерудных минералов преобладают сидерит, кальцит, доломит, барит, кварц, серицит и хлорит. Основная масса руд тонкозернистая и скрытокристаллическая.

Сверху располагается зона окисления мощностью от 5 до 50 м. В составе окисленных руд преобладают гидрооксиды железа. Свинец и цинк в составе окисленных руд присутствуют в виде плюмбоярозита, смитсонита, церуссита, англезита и пироморфита. Содержание свинца в окисленных рудах изменяется от 0,3 до 20 %, цинка от 0,3 до 1,8 %.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Суммарная годовая производительность карьера по руде составляет 6 млн т. Проект разработки месторождения рассчитан на 13 лет. Общий объем вскрышных пород составляет 167,7 млн м^3. Отработка производится с вывозом вскрышных пород во внешние отвалы, которые складируются с южной стороны карьера. Часть вскрышных пород, особенно в начальный период эксплуатации предприятия, используется для строительства и ремонта дорог, зданий и сооружений, возведения дамб обвалования хвостохранилища.

Технологическая схема предполагает использование селективно-коллективной флотации с измельчением руды до крупности 0,044 мм. Ежегодно будет складироваться 4,5 млн т отходов – 3 млн т отвальных пород и 1,5 млн т пиритного концентрата. Сточные воды от промышленных объектов, содержащие нефтепродукты и взвешенные вещества, перед сбросом очищаются на локальных очистных сооружениях. С целью снижения объема образования поверхностного стока весь сток с незагрязненных территорий перехватывается нагорными канавами. С территории промплощадки дождевые и талые воды поступают на очистные сооружения и максимально используются в технологических процессах. На момент обследования на предприятии еще не была запущена обогатительная фабрика, только произведена вскрыша и удалены окисленные руды из карьера.

Описание объекта исследования и полученные результаты

Отвалы вскрышных пород складированы на двух площадках, расположенных к востоку и юго-востоку от карьера (см. рис.1). Обследовались вскрышные породы, складированные к востоку от карьера, представляющие вал крупноглыбового материала высотой 4-5 м. Ширина отвала изменяется от 125 до 250 м, протяженность до 1000 м. У подножия отвала залегают насыщенные водой рыхлые породы. Многолетняя мерзлота располагается на глубине 20-40 см. С восточной стороны отвала протекает временный водоток, формирующий ресурсы за счет атмосферных осадков и конденсации влаги в теле отвала.

Для сбора конденсата было установлено пять конденсаторов по восточному краю отвала. Конденсат удалось собрать только в двух установках, где мощность зоны аэрации превышала 50 см. Также был опробован временный водоток, который возле дороги образовал лужу размером 10×20 м.

На расстоянии 1 км к северо-западу от карьера располагается склад окисленных руд, имеющий форму прямоугольника. Ширина склада составляет 300 м, длина 500 м, мощность складированных окисленных руд 3-4 м. Склад возвышается над окружающей территорией на 100 м. В 500 м к западу от склада расположен жилой поселок, в 300 м к северо-западу – обогатительная фабрика. Складированные окисленные руды не изолированы от воздействия агентов выветривания.

Для выявления влияния склада окисленных руд на загрязнение приземной атмосферы аэрозолями токсичных химических элементов устанавливались пять конденсаторов и пять сборников атмосферных осадков. Схема их размещения приведена на рис.1. Ночью порывами ветра два конденсатора были разгерметизированы, поэтому пробы конденсата удалось отобрать только в трех местах.

Объем конденсационных вод составлял 30-50 мл с 1 м^2, их количество зависит от пористости отходов. Общая минерализация конденсационных вод достигает значений 110-130 мг/дм^3. Общая минерализация атмосферных осадков изменяется от 2 до 35 мг/дм^3. Общая минерализация воды временного водотока достигает 510 мг/дм^3. Микроэлементный состав отобранных проб воды приведен в таблице.

В конденсационных водах установлены высокие содержания ртути, свинца, цинка, меди по сравнению с поверхностными водами. Они поступают из поровой влаги, где накапливаются за счет окислительного разложения сфалерита, галенита, халькопирита, пирита. Обнаруженные в конденсате высокие содержания марганца, железа, алюминия, фосфора, вероятно, связаны с разложением породообразующих минералов. Установлена корреляция между химическим составами поровых вод и аэрозолей [38]. При испарении высокоминерализованных поровых вод над поверхностью образуется слой пара. Так как частицы пара представляют собой не отдельную молекулу воды, а их ассоциацию, то они способны уносить в своем составе растворенные в поровой воде вещества. Качественный и количественный состав аэрозоля зависит от химического состава поровых вод, наблюдаются различия в количестве загрязняющих веществ над складом окисленных руд и отвалами вскрышных пород.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Микроэлементный состав атмосферных осадков, конденсационных вод, отобранных на отвалах вскрышных пород, и окисленных руд в сравнении с фоновой территорией и концентрацией в поверхностных водотоках, мкг/дм^3

Элемент	ПДК$_{рхн}$*, мг/дм^3	Ручей Гундуй-Холой, OV-2	Временный водоток, OV-1	Атмосферные осадки	Конденсационные воды						
					За пределами ГОКа		Вскрышные породы		Склад окисленных руд		
					Z-1	Z-2	OZ-1	OZ-3	OZ-7	OZ- 9	OZ-10
Be	0,0003	0,004	<0,001	0,0023-0,005** / 0,003	0,0024	0,0019	0,004	0,0026	0,009	0,0027	0,0019
B	0,1	8,5	5,1	2,1-2,7 / 2,5	2,7	1,5	9,2	84	26	4,7	2
Al	0,04	15,1	37	11,3-28 / 20,1	6,5	6,9	35	61	107	33	16
P	0,05	126	62	36-57 / 46,2	36	7,6	77	104	250	41	40
Ti	0,06	0,52	1,4	0,33-0,64 / 0,51	0,13	0,12	0,47	1,05	7,3	0,81	1,05
V	0,001	0,35	0,24	0,086-0,179 / 0,122	0,03	0,02	0,125	0,2	0,63	0,11	0,073
Cr	0,07	1,06	0,9	0,92-1,2 / 1,1	0,5	0,4	1,5	1,97	5,9	1,26	3,2
Mn	0,01	380	79	24-910 / 299	11	14	58	129	152	560	99
Fe	0,1	530	81	35-79 / 59	1	1	52	131	230	71	55
Co	0,01	0,61	0,46	0,16-1,9 / 0,61	0,05	0,03	0,24	0,37	1,62	0,99	1,25
Ni	0,01	1,83	1,15	0,66-0,96 / 0,81	0,73	0,31	3,1	3,7	24	2,6	1,78
Cu	0,001	0,97	5,6	0,56-1,24 / 0,98	1,9	0,48	10,1	13,5	59	6,4	1,89
Zn	0,01	6	12,4	8,3-300 / 78	10,8	14,9	39	21	159	111	52
Br	1,35	36	30	5,2-6,4 / 6,12	2,5	1,8	7,4	5,8	34	11,8	7,5
Rb	0,1	0,5	1,47	0,22-0,68 / 0,39	1,04	0,12	0,92	1,54	7,3	1,31	2,1
Ag		0,015	0,03	0,054-0,124 / 0,07	0,01	0,05	0,048	0,046	0,095	0,086	0,23
Cd	0,005	0,028	0,17	0,1-2,5 / 0,82	0,12	0,04	0,85	0,4	0,86	2	2,1
Sn	0,112	0,03	0,042	0,042-0,086 / 0,06	0,14	0,06	0,92	0,15	3	0,118	0,061
Cs	1,0	0,014	0,008	0,012-0,41 / 0,02	0,009	0,008	0,025	0,022	0,036	0,05	0,145
Ba	0,74	450	66	13,8-39 / 28	7,6	3,6	127	145	70	68	92
W	0,0008	0,16	0,08	0,074-0,093 / 0,082	0,03	0,03	0,131	0,15	0,31	0,083	0,083
Au		0,0014	0,005	0,0008-0,0016 / 0,0011	0,0009	0,0009	0,0037	0,002	0,012	0,0026	0,002
Hg	0,00001	0,12	0,12	0,16-0,35 / 0,22	0,11	0,1	0,19	0,09	0,36	0,44	12,9
Tl		0,0021	0,13	0,101-1,9 / 0,75	0,038	0,017	0,051	0,141	0,2	1,8	2,7
Pb	0,006	0,97	2,8	3,9-68 / 28,6	2,3	10,3	17,9	7,3	67	67	90

* 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» (ред. от 13.06.2024 № 320).

** В числителе минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Анализ атмосферных осадков позволил установить в их составе высокие содержания свинца, цинка, марганца, ртути. Содержание ртути в атмосферных водах, относящееся к первому классу опасности, превышает в десятки раз предельно допустимые концентрации, установленные для вод рыбохозяйственного значения. Концентрация наиболее токсичных химических элементов в атмосферных водах (аэрозоле и дожде) намного выше, чем в конденсате, собранном на фоновой территории и в водах временного водотока на территории ГОКа и ручье Гундуй-Холой. Загрязнение атмосферных осадков происходит в результате взаимодействия капелек дождя с ореолом жидкого аэрозоля, который постоянно существует над залежью окисленных руд. Поэтому атмосферные осадки имеют такой же химический состав, что и ореол аэрозолей над исследуемой поверхностью, они различаются только количеством загрязняющих веществ.

На основании приведенных данных можно заключить, что из толщи отвалов вскрышных пород и склада окисленных руд в приземную атмосферу поступают химические элементы, содержание которых много выше концентрации установленной на фоновой территории. Их поступление в атмосферу связано с горными работами, некоторые из них являются токсичными и представляют опасность для здоровья работающих на хранилищах отходов.

Можно ориентировочно рассчитать, какое количество рассматриваемых металлов поступает в приземную атмосферу от хранилищ отходов. Рассмотрим воздействие склада окисленных руд. Его площадь составляет 150000 м^2. С каждого квадратного метра испаряется за ночь в среднем по 40 мл аэрозолей. Рассчитаем их средние концентрации, количество испаряющееся с поверхности 1 м и затем с поверхности всего склада: 1620 мг марганца, 645 мг цинка, 450 мг свинца, 132 мг меди, 24 мг ртути. Эти элементы рассеиваются воздушными потоками на окружающую территорию, попадают в почву, растительность, поверхностные воды. Они находятся в аэрозолях в подвижном состоянии и могут активно взаимодействовать с биотой.

Исследован химический состав снежного покрова территории, находящейся под воздействием выбросов Озерного ГОКа. Опробование снега проводились по профилям, заложенным в юго-восточном направлении от ГОКа в сторону Еравнинской котловины, где расположены озера Харга, Гунда, Эксенд (рис.2).

Все пробы снега отобраны за пределами лицензионного участка ГОКа. Талая вода имеет слабокислую реакцию (pH 5,74-6,43), общая минерализация изменяется в диапазоне от 7 до 94 мг/дм^3. Содержание микроэлементов в снежном покрове в окрестностях Озерного ГОКа, мкг/дм^3: Zn – (4,7-109,0)/17,7; Cu – (0,7-3,5)/1,8; Pb – (0,19-8,0)/1,5; Mn – (2,2-220,0)/64,3; Fe – (42,0-124,0)/69,4; Al – (9,0-59,0)/24,3; P – (11,8-88)/28,1; V – (0,127-1,04)/0,317; Hg – (0,03-0,29)/0,102; Cd – (0,03-0,81)/0,14. В числителе приведены минимальные и максимальные содержания, в знаменателе – средние. В аномально высоких концентрациях, превышающих ПДК рыбохозяйственного значения, обнаружены марганец, цинк, медь, ртуть. Содержание ртути в выпавшем на этой территории снеге превышает предельно допустимые концентрации вод рыбохозяйственного значения в 3-29 раз. Наибольшее значение концентрации определены в пробе О16 (превышено ПДК в 21 раз). Концентрация других элементов (Pb, Cd, Fe) в отдельных пробах снега также выше ПДК.

Таким образом, в снежном покрове установлены высокие содержания тех же химических элементов, которые были установлены в конденсационных водах. Не вызывает сомнения, что их поступление в снежный покров связано с производственной деятельностью горно-добывающего предприятия. За счет атмосферного переноса токсичных веществ в составе аэрозолей загрязняется территория за границами лицензионного участка. При таянии снежного покрова негативному воздействию будут подвергаться уникальные природные образования – Еравнинские озера, имеющие большое рекреационное и рыбохозяйственное значение для региона.

Заключение

При разработке Озерного полиметаллического месторождения происходит загрязнение воздуха жидкими аэрозолями, содержащими высокотоксичные химические элементы. Тяжелые металлы в воздушной среде могут переноситься на большие расстояния и оказывать негативное воздействие на водоемы, имеющие большое рыбохозяйственное и рекреационное значение. Для устранения негативного влияния на окружающую среду предприятию необходимо предусмотреть

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

герметизацию склада окисленных руд, организовать действенный контроль за экологическим состоянием приземной атмосферы, не допускать длительного хранения отходов без проведения рекультивационных работ, предусмотреть средства индивидуальной защиты для персонала, работающего в местах аэрозольного загрязнения атмосферы.

Авторы выражают благодарность магистранту ВСГУТУ К.А.Дубенко за участие в проведении полевых работ и подготовке проб снега для проведения химического анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Uugwanga M.N., Kgabi N.A.* Assessment of metals pollution in sediments and tailings of Klein Aub and Oamites mine sites, Namibia // Environmental Advances. 2020. Vol. 2. № 100006. DOI: 10.1016/j.envadv.2020.100006

2. *Загороднов С.Ю., Май И.В., Кокоулина А.А.* Мелкодисперсные частицы ($PM_{2,5}$ и PM_{10}) в атмосферном воздухе крупного промышленного региона: проблемы мониторинга и нормирования в составе производственных выбросов // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 2. С. 142-147. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-2-142-147

3. *Бортникова С.Б., Юркевич Н.В., Еделев А.В. и др.* Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 2. С. 26-35. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3040

4. *Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю.* Миграция химических элементов в подземных водах горнопромышленной территории // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 9. С. 137-147. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4465

5. *Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M. et al.* Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // Applied Geochemistry. 2014. Vol. 51. P. 229-245. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010

6. *Queiroz H.M., Ying S.C., Abernathy M. et al.* Manganese: The overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse // Environment International. 2021. Vol. 146. № 106284. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106284

7. *Абрамов Б.Н.* Концентрации тяжелых металлов в техногенных ландшафтах Акатуевского полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 67-71. DOI: 10.17308/geo.2018.4/2269

8. *Jianwei Dai, Canxing Sun, Zhuo Yao et al.* Exposure to concentrated ambient fine particulate matter disrupts vascular endothelial cell barrier function via the IL-6/HIF-1α signaling pathway // FEBS Open Bio. 2016. Vol. 6. Iss. 7. P. 720-728. DOI: 10.1002/2211-5463.12077

9. *Макарова М.А., Мамедов В.И., Алехин Ю.В., Шипилова Е.С.* Уникальная роль поровых растворов при образовании бокситов в латеритных корах выветривания (Гвинейская Республика) // Доклады Академии наук. 2019. Т. 489. № 1. С. 65-69. DOI: 10.31857/S0869-5652489165-69

10. *Gitari M.W., Akinyemi S.A., Ramugondo L. et al.* Geochemical fractionation of metals and metalloids in tailings and appraisal of environmental pollution in the abandoned Musina Copper Mine, South Africa // Environmental Geochemistry and Health. 2018. Vol. 40. Iss. 6. P. 2421-2439. DOI: 10.1007/s10653-018-0109-9

11. *Шварцев С.Л.* Есть ли будущее у аддитивных технологий? // Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. № 6. С. 538-547. DOI: 10.7868/S0869587317060068

12. *Чечель Л.П.* Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 52-63.

13. *Плюснин А.М., Дабаева В.В., Жамбалова Д.И. и др.* Редкие земли в поверхностных и подземных водах на территории размещения вольфрамдобывающего производства Забайкалья // Геохимия. 2020. Т. 65. № 7. С. 711-728. DOI: 10.31857/S0016752520060102

14. *Opara C.B., Blannin R., Ebert D. et al.* Bioleaching of metal(loid)s from sulfidic mine tailings and waste rock from the Neves Corvo mine, Portugal, by an acidophilic consortium // Minerals Engineering. 2022. Vol. 188. № 107831. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107831

15. *Старостина С.И., Юркевич Н.В., Шавекина А.Ш., Гаськова О.Л.* Формы нахождения металлов и мышьяка в отходах флотационного обогащения сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2025. № 1 (61). С. 64-74. DOI: 10.20403/2078-0575-2025-1-64-74

16. *Zdravković A., Cvetković V., Šarić K. et al.* Waste rocks and medieval slag as sources of environmental pollution in the area of the Pb-Zn Mine Rudnik (Serbia) // Journal of Geochemical Exploration. 2020. Vol. 218. № 106629. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106629

17. *Замана Л.В., Абрамова В.А., Хвостова Т.Е., Чечель Л.П.* Соединения азота в водах зоны техногенеза рудных месторождений Восточного Забайкалья // Горный журнал. 2020. № 3. С. 79-83. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.15

18. *Fuentes-López J.M., Olías M., León R. et al.* Stream-pit lake interactions in an abandoned mining area affected by acid drainage (Iberian Pyrite Belt) // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 833. № 155224. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155224

19. *Minnaar A.* Water Pollution and Contamination from Gold Mines: Acid Mine Drainage in Gauteng Province, South Africa // Water, Governance, and Crime Issues. Springer, 2020. P. 193-219. DOI: 10.1007/978-3-030-44798-4_12

20. *Юргенсон Г.А., Филенко Р.А.* Современное минералообразование в геотехногенном ландшафте Шерловогорского рудного района // Геосферные исследования. 2018. № 4. С. 32-43. DOI: 10.17223/25421379/9/4

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

21. *Blois L., Lay-Ekuakille A.* Environmental impacts from atmospheric emission of heavy metals: A case study of a cement plant // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 18. № 100313. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100313

22. *Qiang Wan, Xiaobing Cui, Jiman Shao et al.* Beijing ambient particle exposure accelerates atherosclerosis in ApoE knockout mice by upregulating visfatin expression // Cell Stress and Chaperones. 2014. Vol. 19. Iss. 5. P. 715-724. DOI: 10.1007/s12192-014-0499-2

23. *Калаева С.З., Муратова К.М., Чистяков Я.В., Чеботарев П.В.* Влияние мелкодисперсной пыли на биосферу и человека // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. Вып. 3. С. 40-63.

24. *Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Abrosimova N.A. et al.* Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings // Journal of Geochemical Exploration. 2018. Vol. 186. P. 256-269. DOI: 10.1016/j.gexplo.2017.12.008

25. *Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю. и др.* Минералого-геохимическая характеристика снежного покрова в районах горнорудного производства // Геохимия. 2021. Т. 66. № 7. С. 659-672. DOI: 10.31857/S0016752521060078

26. *Глинянова И.Ю.* Мониторинг аэрозолей в атмосферном воздухе населенных пунктов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 2. С. 371-380.

27. *Суюндуков Я.Т., Семенова И.Н., Хасанова Р.Ф., Ильбулова Г.Р.* Влияние экологических факторов на заболеваемость населения геохимической провинции // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2023. Т. 9 (19). Вып. 2. С. 364-373.

28. *Yong Du, Lv Chen, Ping Ding et al.* Different exposure profile of heavy metal and health risk between residents near a Pb-Zn mine and a Mn mine in Huayuan county, South China // Chemosphere. 2019. Vol. 216. P. 352-364. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.142

29. *Ngole-Jeme V.M., Fantke P.* Ecological and human health risks associated with abandoned gold mine tailings contaminated soil // PloS One. 2017. Vol. 12. № 2. e0172517. DOI: 10.1371/journal.pone.0172517

30. *Zychowski K.E., Wheeler A., Sanchez B. et al.* Toxic Effects of Particulate Matter Derived from Dust Samples Near the Dzhidinski Ore Processing Mill, Eastern Siberia, Russia // Cardiovascular Toxicology. 2019. Vol. 19. Iss. 5. P. 401-411. DOI: 10.1007/s12012-019-09507-y

31. *González D., Infante A., López L. et al.* Airborne fine particulate matter exposure induces transcriptomic alterations resembling asthmatic signatures: insights from integrated omics analysis // Environmental Epigenetics. 2025. Vol. 11. Iss. 1. № dvae026. DOI: 10.1093/eep/dvae026

32. *Dumıtru M., Cărăbiş D., Pârvan L., Sârbu C.* Environmental Rehabilitation of Mining Dumps // Agriculture and Agricultural Science Procedia. 2016. Vol. 10. P. 3-9. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.09.002

33. *Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Томиленко А.А. и др.* Состав газов межпорового пространства техногенных тел // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. № 10. С. 1385-1397. DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.09.002

34. *Абрамова В.А., Птицын А.Б.* Криогеохимические процессы в зонах окисления рудных месторождений (аналитический обзор). Ч. 1. Общие физико-химические закономерности процессов выветривания в криолитозоне // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2017. № 2 (30). С. 69-78. DOI: 10.20403/2078-0575-2017-2-69-78

35. Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия / Отв. ред. С.Л. Шварцев. Новосибирск: Наука, 1982. 284 с.

36. *Ukraintsev A.V., Plyusnin A.M., Zaikovskii V.I.* Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 122. № 104723. DOI: 10.20403/2078-0575-2017-2-69-78

37. *Оганесянц Л.А., Севостьянова Е.М., Кузьмина Е.И. и др.* Изучение изотопного и химического состава глубинной воды озера Байкал // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 723-732. DOI: 10.21603/2074-9414-2021-4-723-732

38. *Плюснина А.М., Воронина Ю.С., Украинцев А.В. и др.* Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд // Геохимия. 2023. Т. 68. № 12. С. 1295-1311. DOI: 10.31857/S0016752523110092

***Авторы*: Алексей Максимович Плюснин,** *д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник* (*Геологический институт им. Н.Л.Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия*), https://orcid.org/0000-0001-9380-7281, **Александр Викторович Украинцев,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Геологический институт им. Н.Л.Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия*), ukraintsev87@bk.ru, https://orcid.org/0000-0001-6919-0736, **Михаил Константинович Чернявский,** *канд. геогр. наук, научный сотрудник* (*Геологический институт им. Н.Л.Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия*), https://orcid.org/0000-0003-1426-3998.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0