

Содержание редкоземельных элементов в снежном покрове на территории Джидинского ГОКа

Ю. С. Воронина^{1✉}, А. М. Плюснин^{1,2}

¹Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Российская Федерация (670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а)

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская 40в)

Аннотация. Целью исследования является изучение геохимических особенностей распределения редкоземельных элементов в снежном покрове территории, занятой отходами Джидинского вольфрам-молибденового комбината.

Материалы и методы. Определение микроэлементного состава проводилось в Лаборатории водной микробиологии Лимнологического института СО РАН (город Иркутск) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 се методом индуктивно связанной плазмы. Макрокомпонентный состав снеговой воды был определен в лаборатории гидрогеологии и геоэкологии ГИН СО РАН (город Улан-Удэ) по стандартной методике. В основу работы положен фактический материал, собранный при выполнении проектов Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН города Улан-Удэ за период 2021-2022 годы.

Результаты и обсуждение. При исследовании территории Джидинского ГОКа в городе Закаменск Республики Бурятия в снежном покрове установлены высокие концентрации токсичных элементов, которые опасны для здоровья населения города Закаменск, а также аномальные концентрации некоторых редкоземельных элементов. Установлено, что повышенные содержания большинства лантаноидов напрямую зависят от повышенных концентраций сульфат-иона на исследуемой территории.

Заключение. Выявлено, что на Барун-Нарынском хвостохранилище за длительный период хранения накопилось большое количество тонкой фракции продуктов выветривания, на которой интенсивно сорбируются все редкоземельные элементы. Сульфатные комплексные соединения редкоземельных элементов (РЗЭ) отличаются высокой миграционной способностью в виде аэрозолей.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, аэрозоли, сульфат-ион, редкоземельные элементы, комплексные соединения.

Источник финансирования: 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».

Для цитирования: Воронина Ю. С., Плюснин А. М. Содержание редкоземельных элементов в снежном покрове на территории Джидинского ГОКа // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 2, с. 122-132. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/2/122-132>

ВВЕДЕНИЕ

Горнорудная промышленность характеризует- ся как одна из наиболее негативно влияющих на окружающую среду. Горнодобывающие предприятия оставляют за собой не только огромные площади занятые твердыми отходами, но и рудничные воды, изливающиеся из заброшенных разведочных

штолен, сточные воды от обогатительных фабрик, загрязненные грунтовые воды. Десятки миллионов тонн техногенных песков в течение длительного времени накапливают в себе продукты разрушения рудной минерализации. При их хранении протекают окислительно-восстановительные химические реакции, в результате которых образуются ток-

© Воронина Ю. С., Плюснин А. М., 2023

✉ Воронина Юлия Сергеевна, e-mail: u_voronina96@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

сичные вещества, способные мигрировать в воздушной среде. При длительном хранении в толще песков накапливаются тонкодисперсные частицы, образующиеся в результате разрушения породообразующих минералов, на поверхности которых сорбируются различные токсичные химические элементы. Техногенная взвесь, под воздействием ветра, мигрирует на окружающую территорию, попадает в растительность на сельскохозяйственных угодьях, в организм животных и человека.

Крупнейшим рудным районом по добыче вольфрама и молибдена в Республике Бурятия является Закаменский район, где разрабатывались три месторождения Холтосон, Инкур, Первомайское. Негативное воздействие горнодобывающей промышленности на природу в Республике Бурятия связано с деятельностью Джидинского ГОКа. Период функционирования предприятия охватывает 1937-1997 годы, после закрытия которого остались десятки млн. тонн твердых отходов, которые и в настоящее время оказывают негативное влияние на окружающую среду.

Ранее нами проводились исследования поведения редкоземельных элементов на территории Джидинского ГОКа в подземных и поверхностных водах. Установлено, что при длительном хранении отходов в поровых водах техногенных песков, в прудах накопителях промывных вод их суммарное содержание достигает нескольких мг/л [11]. Несомненно, высокие содержания в водах будут проявляться соответствующими концентрациями и в воздухе. В качестве индикатора загрязнения атмосферного воздуха в геоэкологии широко применяется исследование снежного покрова, так как снег накапливает в себе аномальные выбросы за длительный период и может дать характеристику интегрального загрязнения воздуха исследуемой территории. В представленной статье впервые приведены результаты изучения снежного покрова в этом горнорудном районе, включая определение содержания редкоземельных элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения химического состава снежного покрова на территории Джидинского ГОКа было отобрано 22 пробы снега. Район исследования включал в себя места, находящиеся в непосредственной близости с хвостохранилищами, территорию города Закаменска и его окрестностей. Для установления фоновых значений отбирались пробы снега в долине рек Джиды и Мыргеншено. На рисунке 1 представлена схема опробования снежного покрова.

Отбор снежного покрова производился следующим образом: с помощью рамки размерами 50 x 50 см выделялся участок для отбора снега. С участка поверхности, ограниченного рамкой, отбирался весь снег за исключением слоя, соприкасающегося с почвой. Пробы помещались в полиэтиленовые пакеты для транспортировки, затем пробы снега таялись при комнатной температуре. Пробоподготовка для определения макро- и микросостава заключалась в отделении нерастворимых частиц от талой воды. Отстаивание взвеси производилось в течение 2 суток, после чего вода сливалась, не затрагивая осадок. Оставшаяся над осадком вода фильтровалась через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Нерастворимые частицы, выпавшие на дно, высушивались и взвешивались.

Исследование микрокомпонентного состава талой воды проводилось в лаборатории водной микробиологии Лимнологического института СО РАН (город Иркутск) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 се методом индуктивно связанной плазмы. Содержание катионов/анионов снеговой воды было определено в лаборатории гидрогеологии и геоэкологии ГИН СО РАН (город Улан-Удэ) по стандартным методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сформировавшаяся природно-техногенная система площадью около 100 га, содержит в себе территории занятые отходами добычи и переработки руд. Отходы добычи, представленные вскрышными породами и некондиционными рудами, размещены вблизи Первомайского и Инкурского карьеров на водоразделе ручья Инкур и реки Мергэншэнно. Отходы переработки Джидинского ГОКа были складированы в хвостохранилище намывного типа в пади реки Барун-Нарын. В настоящее время производится их вторичная переработка. После извлечения вольфрамита гравитационным способом, промытые техногенные пески складировываются в хвостохранилище, расположенном в долине реки Зун-Нарын.

Исследуемая территория располагается в Джидинском рудном районе в юго-западной части Саяно-Байкальского складчатого пояса [4]. Район исследования представлен сложным коллизионным орогеном, геологическая структура которого определяется дислокациями позднепалеозойского этапа со значительной сдвиговой составляющей. Распространенными являются осадочно-вулканогенные образования энсиматической островной дуги (хохюртовская свита) и Джидотского палео-

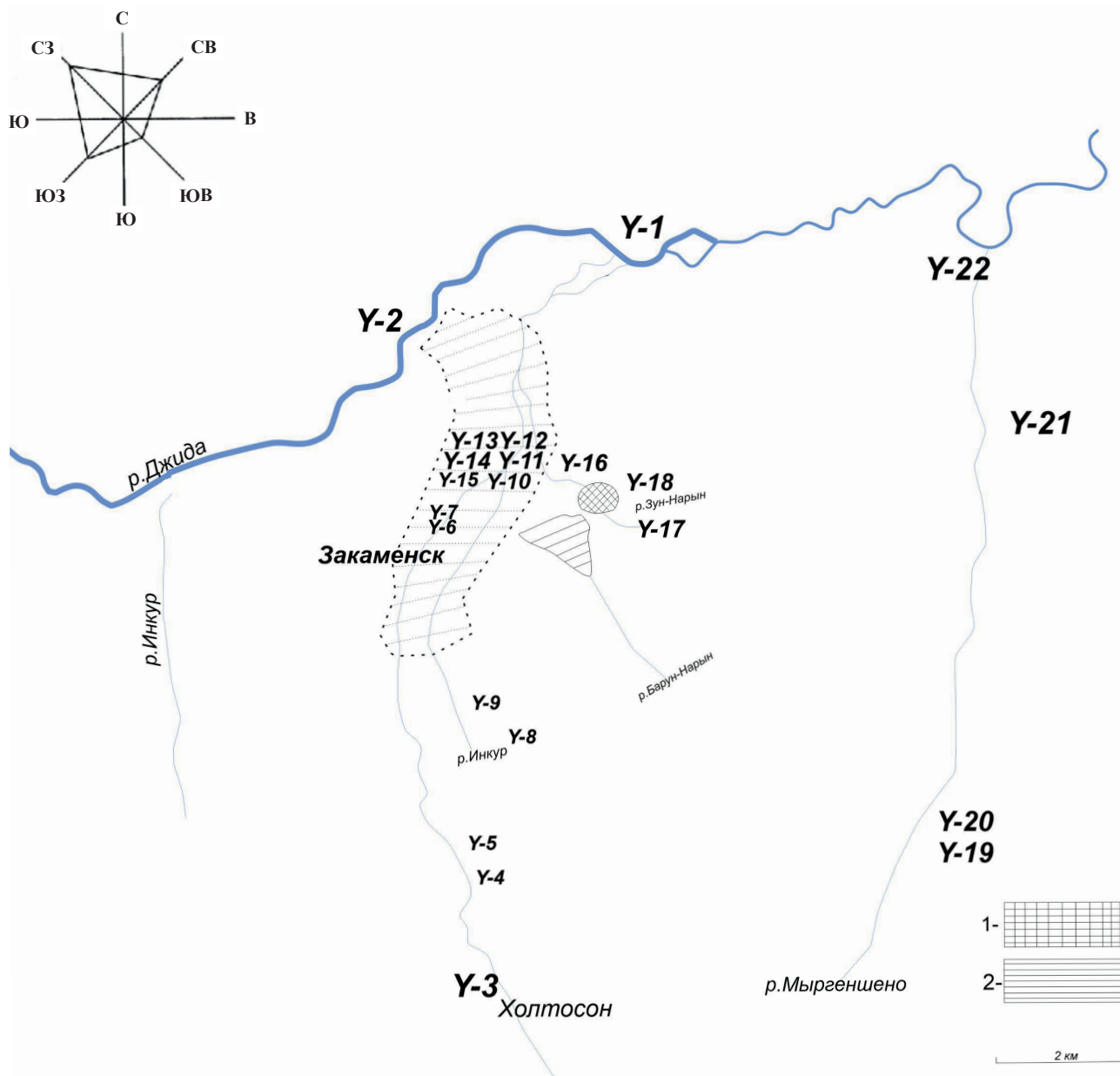


Рис.1. Схема опробования снежного покрова.

1- Зун-Нарынское хвостохранилище, 2- Барун-Нарынское хвостохранилище

[Fig.1. Snow cover testing scheme.

1-Zun-Narynskoe disposal, 2- Barun-Narynskoe disposal]

гайота (хасуртинская толща), а также габбро-диорит-тоналит-плаггиогранитная ассоциация пород повышенной основности [3].

На территории района сосредоточены крупнейшие месторождения вольфрама и молибдена – Инкур, Холтосон. Инкурское вольфрамовое месторождение штокверкового типа приурочено к экзоконтакту массива гранитов позднего палеозоя с вмещающими кварцевыми диоритами и осадочно-вулканогенными образованиями. Штокверковая зона содержит в себе рудные прожилки в составе которых: кварц, гюбнерит, мусковит,

сфарелит, галенит, блеклая руда, шеелит, берилл, молибденит, айкинит, встречаются участки, обогащенные флюоритом [4]. Холтосонское вольфрамовое месторождение относится к гюбнерит-сульфидно-кварцево-березитовой жильной рудной формации. Месторождение включает в себя серию кварц-гюбнеритовых жил, залегающих в большей степени в кварцевых диоритах джидинского комплекса [1]. В тектоническом отношении Джидинский рудный район располагается в переходной зоне между байкальской и палеозойской складчатыми областями [5].

Территория относится к системе отрогов Джидинского хребта. В городе Закаменск, который располагается на первой надпойменной террасе реки Модонкуль, абсолютные отметки составляют 1040-1070 м. Основной водной артерией исследуемого района является река Джида, которая является притоком реки Селенга, а основная масса застройки и инженерных сооружений селитебной и производственной зоны города Закаменск расположена в долине реки Модонкуль и в приустьевой части ручья Инкур. К востоку и юго-востоку от жилой зоны города располагаются Барун-Нарынское и Зун-Нарынское хвостохранилища общей площадью около 100 га [15]. Хранилища отходов переработки руд располагаются выше города на 20-30 м, они отделены от долины реки Модонкуль дамбами.

Климат района резко континентальный, скорость ветра составляет 0,3 м/с зимой и до 2 м/с весной. Максимальная скорость в весенне-лет-

ний сезон достигает 20 м/с. По метеоусловиям, определяющим рассеивание вредных примесей в атмосфере, территория города Закаменска относится к зоне с опасным потенциалом загрязнения. Часты инверсии потоков воздуха, особенно зимой в ночное время. Периодические застои воздуха в приземном слое способствуют загрязнению воздуха техногенными выбросами.

Лабораторно-инструментальные исследования показали, что распределение показателя рН в пробах снега определяет исследуемую среду как слабокислую. Минерализация проб колеблется от 19,4 до 968,5 мг/дм³, среднее содержание равно 148,1 мг/дм³.

Высокими концентрациями в талых водах характеризуется сульфат-ион. Его содержание варьирует от 4,4 до 682,6 мг/дм³, в среднем – 63,1 мг/дм³ (табл. 1). В двух пробах обнаружены аномально высокие содержания – 192,2 мг/дм³ и 682,6 мг/дм³.

Таблица 1

Средний макрокомпонентный состав снежного покрова, мг/дм³
 [Table 1. Average macro-component composition of snow cover, mg/dm³]

NH₄⁺	Na⁺	Ca⁺	Mg⁺	K⁺
1,4	4	16	13	1.3
HCO⁻	NO₃⁻	NO₂⁻	SO₄²⁻	Cl⁻
44	1,4	0.2	63,1	2.4

Талые воды относятся к пресным гидрокарбонатно-сульфатным натриево-кальциево-магниевым.

Установлены отличия в макрокомпонентном составе снеговых вод в Барун-Нарынском и Зун-Нарынском хвостохранилищах. В первом

техногенные пески хранятся длительное время, начиная с 1958 года, второе формируется в настоящее время из промытых песков первого. В Барун-Нарынском хвостохранилище снеговые воды относятся к гидрокарбонатному химическому типу, в Зун-Нарынском – к сульфатному (рис. 2).

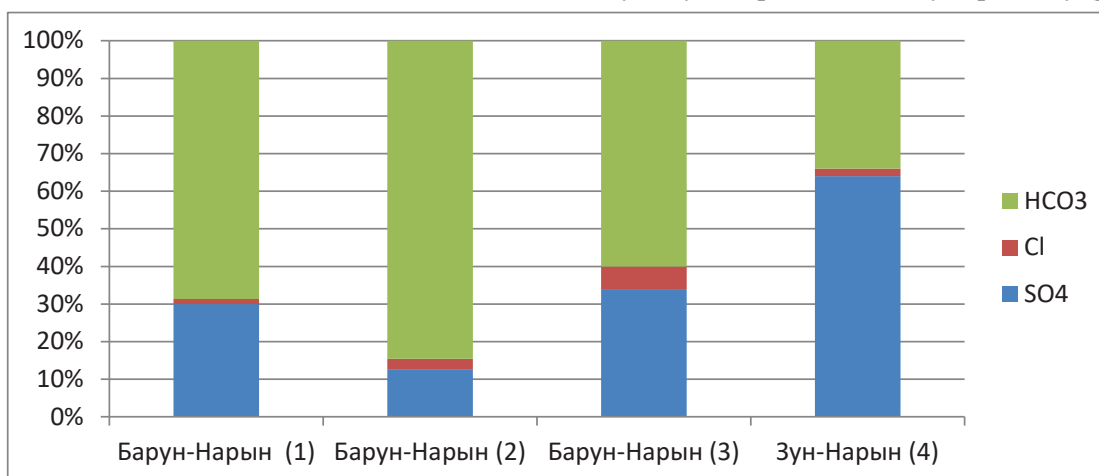


Рис.2. Гистограммы распределения анионного состава талых вод в хвостохранилищах Барун-Нарын и Зун-Нарын
 [Fig.2. Histograms of the distribution of the anionic composition of meltwater in the Barun-Naryn and Zun-Naryn disposals]

Снежный покров исследуемой территории характеризуется высокими содержаниями тяжелых металлов, которые превышают ПДК вод рыбохозяйственного назначения в десятки и сотни раз. Особое положение занимает марганец, в одной пробе установлено его содержание 2200 мкг/дм³, в остальных пробах концентрация марганца варьирует от 16,6 до 320 мкг/ дм³, что также не является нормой. Максимальное значение концентраций алюминия составило 14600 мкг/дм³; цинка – 1260; меди – 95; свинца – 10,1; никеля – 87; вольфрама – 1,76; железа – 76, фосфора – 220; кадмия – 31.

В снеговой воде обнаружены значительные концентрации редкоземельных элементов. Их суммарная концентрация изменяется в широком диапазоне (0,552 – 1,396 мкг/дм³), среднее содержание составляет 0,876 мкг/дм³. Относительно высокими концентрациями выделяются Pr, Gd и Yb. На рисунке 3 приведены их средние содержания по 22 пробам и график распределения средних содержаний РЗЭ, нормированный по североамериканскому сланцу (NASC). Наблюдается

преобладание легких РЗЭ над тяжелыми, имеется цериевый, ербиевый минимумы, празеодимовый, гадолиниевый и иттербиевый максимумы.

Редкоземельные элементы представляют собой группу элементов, обладающих сходными химическими свойствами, несмотря на различия в атомной массе. В свободном состоянии РЗЭ являются типичными металлами. Все они, как правило, трехвалентны (+3), хотя церий, празеодим, тербий могут изменять валентность до +4, а неодим, самарий, европий, туллий, иттербий до +2. РЗЭ классифицируются на легкие (La – Pr), средние (Nd – Cd) и тяжелые (Tb – Lu). В поверхностных водах преобладающую роль в переносе РЗЭ играет взвешенная форма. В природно-техногенных водных растворах РЗЭ склонны к комплексообразованию с различными неорганическими и органическими лигандами [19]. Процессы фракционирования РЗЭ в водных средах во многом связаны с процессами адсорбции/десорбции, поэтому легкие РЗЭ преимущественно переносятся в водном растворе либо в виде коллоидов, либо адсорбируются на суспензионный материал [20].

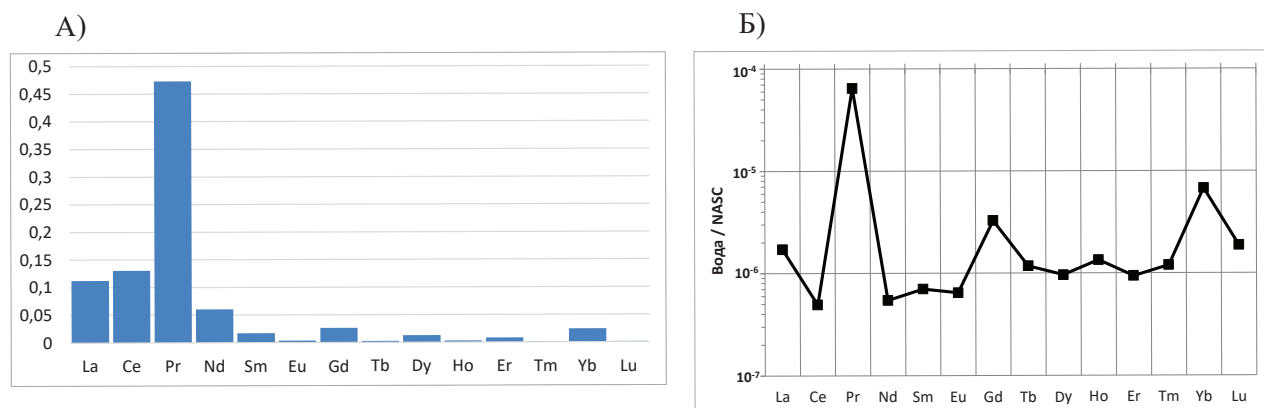


Рис. 3. Содержание РЗЭ в талых водах, мкг/дм³ (А) и нормированные относительно NASC (Б)
 [Fig.3. The content of rare-earth elements in the meltwater, mcg/dm³(A) and rationing is relative of NASC (B)]

Влияние РЗЭ на окружающую среду мало изучено. Известно только то, что они обладают токсичными свойствами и отрицательно сказываются на живых организмах. В России установлены ПДК для питьевой воды только для европия (0,3 мг/л) и самария (0,024 мг/л). Источники загрязнения окружающей среды РЗЭ в настоящее время – это золоотвалы от ТЭЦ, месторождения сульфидных руд, горнодобывающие и горноперерабатывающие предприятия, а также хозяйственно-бытовые стоки промышленных производств. Рассматривались закономерности распределения РЗЭ в водах техногенно-измененных территорий, повышенные концентрации РЗЭ в воде объяснялись концентрациями РЗЭ во вмещающих породах [12].

В нашем исследовании установлена взаимосвязь содержаний РЗЭ и сульфат-иона. Наблюдается как общая зависимость суммарного содержания редкоземельных элементов от концентрации сульфат-иона, так и отдельных редкоземельных элементов (рис. 4). Исключение составляют только две пробы с аномально высоким содержанием сульфат-иона. Мы предполагаем, что имеется два или несколько источников поступления сульфат иона в атмосферу района. В основной массе отобранных проб сульфат-ион поступает в снег из мест хранения отходов переработки руд. В хвостохранилищах активно протекают процессы окислительного разрушения не только остаточной сульфидной минерализации, но и вмещающих оруденение пород. Ранее нами было

установлено, что в результате длительного взаимодействия кислых поровых вод с вмещающими породами в них стали преобладать тяжелые редкоземельные элементы [11]. Такое распределение РЗЭ мы и наблюдаем в снежном покрове. Только в отличие от

поровых вод в снеге наблюдается аномально высокое содержание празеодима, гадолиния и иттербия. Такое их поведение возможно связано с особенностями их свойств, которые проявляются при смене фазово-агрегатного состояния.

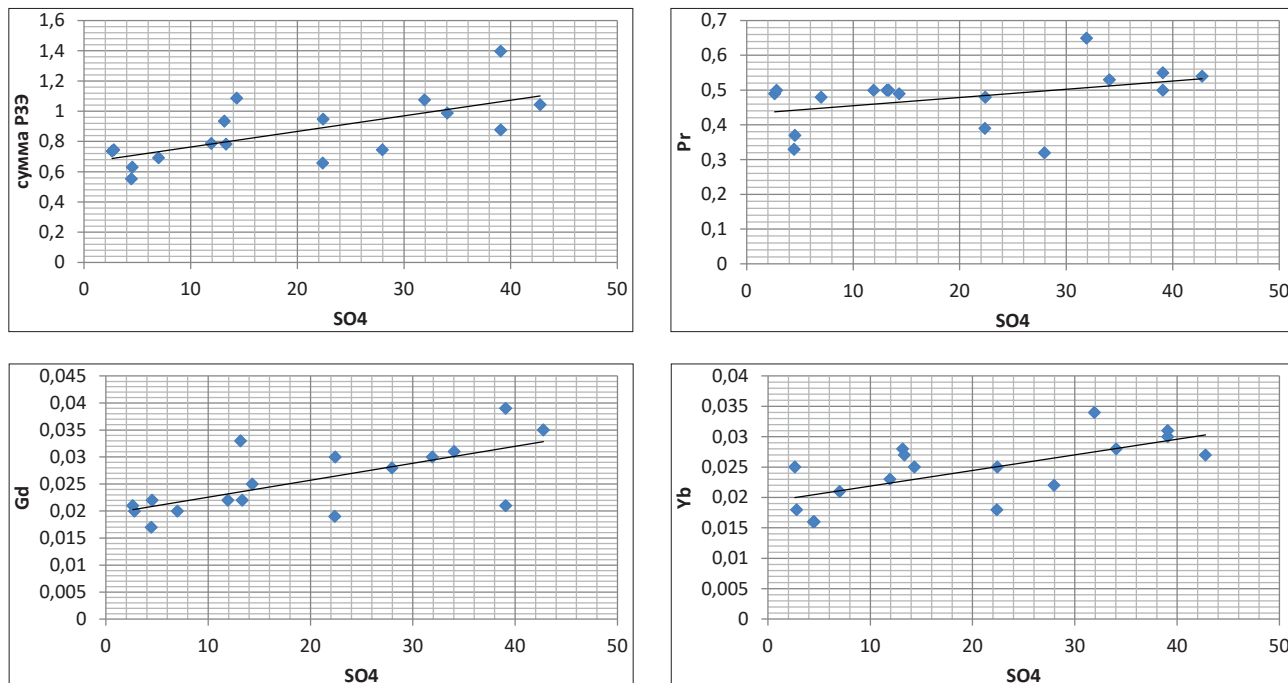


Рис. 4. Зависимость содержания редкоземельных элементов от количества сульфат-иона в снеговой воде [Fig.4. Dependence of rare earth element content on the amount of sulphate ion in snow water]

Известно, что РЗЭ могут мигрировать в водах в растворенном и сорбированном на взвеси состоянии. В растворенном состоянии подавляющая часть РЗЭ (92-95 %) в пресных подземных водах мигрирует в виде карбонатных комплексных соединений (РЗЭСО_3^+). Второе место занимает бескомплексная форма (РЗЭ^{3+}). Третьей формой миграции для легких является сульфатная форма (РЗЭSO_4^+), для тяжелых РЗЭ в виде комплекса с фтором [2].

В поверхностных водах основной формой миграции РЗЭ является взвешенная форма (до 80 %), в то время, как на долю растворенной формы приходится менее 20 % суммарного количества РЗЭ. Тяжелые редкоземельные элементы более устойчивы в растворенном состоянии, наблюдается некоторое обеднение взвесей рек этими элементами [17].

Вероятно, взвешенная форма редкоземельных элементов играет большую роль в переносе вещества в атмосфере и в формировании аномалий в снежном покрове. На рисунке 5 представлена зависимость концентрации РЗЭ от количества твердого вещества в снеге.

Как видно из графиков, просматривается линейная зависимость концентрации РЗЭ от содер-

жания взвешенного вещества. Нам представляется, что это связано с тем, что в местах хранения РЗЭ высаживаются из поровых вод на тонкой взвеси, которая образуется при выветривании пород, хранящихся в хвостохранилищах. Затем эта взвесь под воздействием ветра попадает в атмосферу и выпадает на поверхность вместе со снегом. При таянии снега РЗЭ частично десорбируются и попадают в раствор. Чем больше такой взвеси в снеге, тем выше концентрация РЗЭ. Для празеодима такой зависимости не установлено.

По всей вероятности, основной неорганической формой миграции РЗЭ в атмосферных осадках выступает сульфатная форма ($\text{REE}[\text{SO}_4]^{+1}$). В нейтральных и кислых водных растворах ионы празеодима могут находиться в составе аквакомплексов типа $[\text{Pr}(\text{H}_2\text{O})_n]^{3+}$ и гидроаквакомплексов $[\text{Pr}(\text{H}_2\text{O})_n\text{OH}]^{2+}$ где $n=5-8$ [8]. Да и в целом растворенная форма миграции больше характерна для легких и меньше – для тяжелых РЗЭ [2].

Нам представляется, что в отходах переработки руд до сих пор протекают химические реакции окисления оставшейся сульфидной минерализации, в результате чего в поровых водах сформиро-

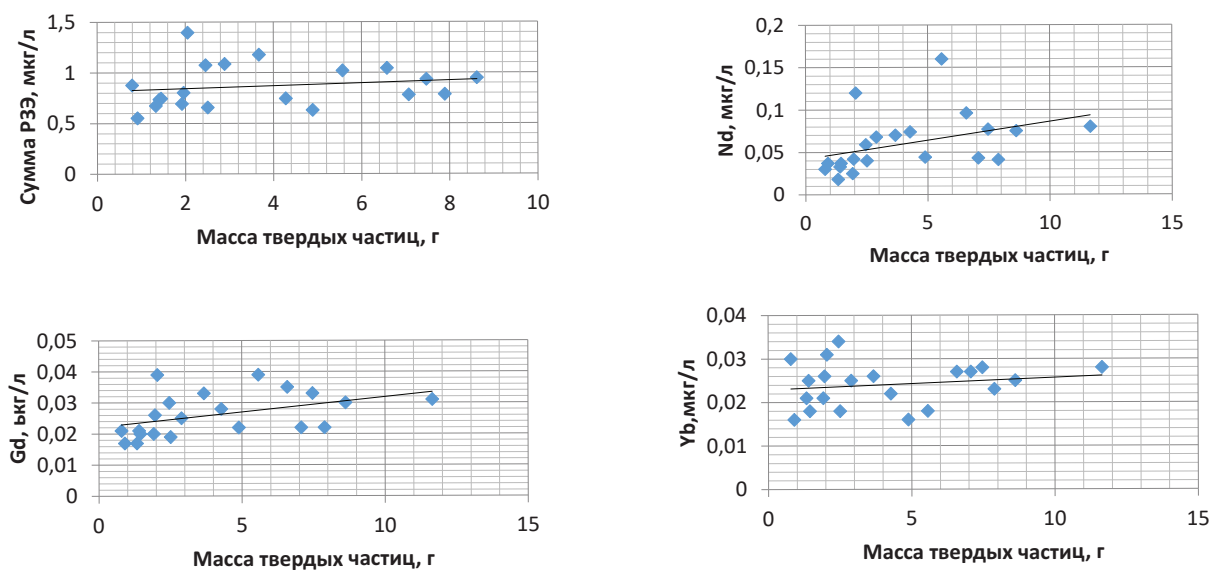


Рис. 5. Зависимость содержания редкоземельных элементов от количества взвешенного вещества
 [Fig. 5. Dependence of rare earth element content on the amount of suspended matter]

вана агрессивно-кислая среда, накопились токсичные химические элементы: Mn, Cd, Al, Cu и другие. Окисление сульфидов происходит с выделением тепла. В результате создаются конвективные потоки газов и воды, направленные из толщи к поверхности. В этих потоках происходит миграция вещества как в водной, так и в воздушной средах.

На Барун-Нарынском хвостохранилище за длительный период хранения в толще песков накопилось большое количество тонкой фракции взвеси, состоящей из продуктов выветривания пород, на которой сорбируются редкоземельные элементы. Аномально высокое содержание празеодима в снеге, вероятно, связано с тем, что этот элемент слабо сорбируется взвесью. Его сульфатные комплексные соединения хорошо мигрируют в водной и воздушной среде.

На Зун-Нарынском хвостохранилище взвеси значительно меньше, так как она удалена из песков при их промывке. Здесь мы в снеге наблюдаем высокие содержания сульфат-иона и многих микроэлементов, включая РЗЭ. Аномально высокие содержания сульфат-иона, тяжелых металлов и установленное содержание празеодима, вероятно, связано с активизацией окислительного разрушения сульфидной минерализации в толще песков, так как произошло вымывание гипергенных образований, и сульфиды оказались доступными для агентов выветривания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование геохимических особенностей РЗЭ в снежном покрове на территории Джидинского ГОКа показало, что их высокое содержание связано с процессами окисления оста-

точной рудной минерализации. Установленные аномальные концентрации сульфат-иона и аномально высокие содержания празеодима в пробах коррелируют между собой. Высокая склонность празеодима к комплексобразованию приводит к распространению в воздушной среде в виде аэрозолей и выпадению с атмосферными осадками.

По содержанию редкоземельных элементов в химическом составе талых вод можно выявить места наиболее активно протекающих процессов окисления сульфидов в отходах добычи и переработки руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология и полезные ископаемые Джидинского рудного района / Ходанович П.Ю., Смирнова О.К., Асташков Г.Ф. и др. // *Джидинский рудный район*, 1984, с.21-35.
2. Геохимия редкоземельных элементов в подземных водах Сихоте-Алинской складчатой области (Дальний Восток России) / Н.А. Харитонова, Е.А. Вах, Г.А. Челноков и др. // *Тихоокеанская геология*, 2016, № 2, с. 68-82.
3. Джидинская зона – фрагмент Палеоазиатского океана / А.И. Альмухамедов, И.В. Гордиенко, М.И. Кузьмин и др. // *Геотектоника*, 1996, № 4, с. 25-42.
4. Джидинский рудный район: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования, прогнозы и перспективы освоения / И.В. Гордиенко, Д.В. Гороховский, О.К. Смирнова и др. // *Геология рудных месторождений*, 2018, т. 60, № 1, с. 3-37.
5. Жаворонкин О.В. Неотектоническая структура джидинского синклинория по данным мофометрического анализа // *Материалы Всероссийской науч-*

ной конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Геологи XXI века», 2003, с. 14-16.

6. Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби / В.П. Шевченко, С.Н. Воробьев, С.Н. Кирпотин и др. // *Оптика атмосфера и океана*, 2015, № 6, с. 499-504.

7. Кожевникова Н.М. Исследование кинетики и равновесия сорбции ионов празеодима (III) природным морденитсодержащим туфом // *Химия в интересах устойчивого развития*, 2012, т. 20, № 3, с. 335-338.

8. Кожевникова Н.М., Вамбуева С.А. Распределение валового содержания и подвижных форм лантана, церия, неодима и самария в профиле борового песка Забайкалья // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*, 2014, № 1, с. 117-119.

9. Пигарева Н.Н., Убугунов Л.Л., Кожевникова Н.М. Содержание редкоземельных элементов цериевой подгруппы (La, Ce, Nd, Sm) в мерзлотных почвах Бурятии // *Агрохимия*, 2018, № 12, с. 60-68.

10. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 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».

11. Редкие земли в поверхностных и подземных водах на территории размещения вольфрамодобывающего производства Забайкалья / А.М. Плюснин, В.В. Дабаева, Д.И. Жамбалова и др. // *Геохимия*, 2020, т. 65, № 7, с. 711-728.

12. Редкоземельные элементы в подземных водах Томского водозабора / В.К. Попов, Е.Ю. Пасечник, П.И. Проценко, О.Ю. Гончаров // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2018, т. 329, № 6, с. 97-105.

13. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеохимия редкоземельных элементов техногенной зоны гипергенеза отработанного медноколчеданного рудника // Материалы третьей Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», 2018, с. 370-374.

14. Семенова И.Н., Абдуллина Л.А., Рафикова Ю.С. Загрязнение объектов окружающей среды в зоне вли-

яния Бурибаевского горно-обогатительного комбината и показатели заболеваемости населения // *Фундаментальные исследования*, 2011, № 10, с. 558-560.

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

16. Тимофеев И.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Геохимия почвенного покрова горнопромышленных ландшафтов на юго-западе Забайкалья (город Закаменск) // *География и природные ресурсы*, 2016, № 3, с. 49-61.

17. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности накопления и фракционирования редкоземельных элементов в поверхностных водах Дальнего Востока в условиях природных и антропогенных аномалий // *Геохимия*, 2011, № 5, с. 523-549.

18. Шумилова М.А., Садиуллина О.В., Петров В.Г. Исследование загрязненности снежного покрова на примере города Ижевска // *Вестник Удмуртского университета*, 2012, № 2, с. 83-87.

19. Bidday R., Cidu R., Frau F. Rare earth elements in waters in albitite – bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy // *Chemical Geology*, 2002, vol.182, pp. 1-14.

20. Byrne R.H., Kim K.N. Rare earth elements scavenging in seawater // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, no. 54, pp. 2645-2656.

21. Duncan T., Shaw T.J. The mobility of rare earth elements and redox sensitive elements in the groundwater/seawater mixing zone of a shallow coastal aquifer // *Aquat Geochim*, 2003, vol. 9, pp. 223-255.

22. Origin of rare earth elements signatures in groundwaters of circumneutral pH from southern Nevada and eastern California, USA / K.H. Johansson, X. Zhou, C. Guo, K.J. Stetzenbach, V.F. Hodge // *Chemical Geology*, 2000, vol. 164, pp. 239- 257.

23. Rare earth elements in chloride-rich groundwater, Palo Duro Basin, Texas, USA / D. C. Gosselin, M. R. Smith, E.A. Lepel, J.C. Laul // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, vol. 56, pp. 1495-1505.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 27.06.2022

Принята к публикации 05.06.2023

Content of Rare Earth Elements in Snow Cover in the Area of the Dzhidinsky Mining and Processing Plant

Yu. S. Voronina¹ ✉, A. M. Plusnin^{1,2}

¹Dobretsov Geological Institute SB RAS, Russian Federation
(670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy Str., 6a)

²East Siberian State University of Technology and Management
(670013, Ulan-Ude, Klyuchevskaya Str., 40b)

Abstract. The aim of the research is to investigate the geochemical features of rare-earth elements distribution in the snow cover of the territory occupied by the wastes of the Dzhidinskiy tungsten-molybdenum combine.

Materials and methods. The microelement composition was determined in the Laboratory of Water Microbiology of the Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk) using an Agilent 7500 ce quadrupole mass spectrometer by the inductively coupled plasma method. The macrocomponent composition of snow water was determined in the laboratory of hydrogeology and geoecology of the Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude) by the standard methodology. The work is based on actual material collected during the implementation of projects of the N. L. Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, for the period 2021-2022.

Results and discussion. The research of the area of the Dzhidinsky mining and processing plant in the town of Zakamensk in the Republic of Buryatia revealed high concentrations of toxic elements in the snow cover, which are dangerous to the health of the population of Zakamensk, as well as anomalous concentrations of some rare-earth elements. It was found that the elevated concentrations of most lanthanides directly depend on the elevated concentrations of sulphate-ion in the study area.

Conclusion. It has been revealed that the Barun-Naryn tailings dump has accumulated a large amount of fine fraction of weathering products, on which all rare-earth elements are intensively sorbed, over a long period of storage. Sulphate complex compounds of rare-earth elements are characterized by high migration capacity in the form of aerosols.

Key words: atmospheric pollution, aerosols, sulfate ion, rare earth elements, complex compounds.

Funding: The research was carried out within the state assignment of the State Geological Institution of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences under the project AAAA-A21-121011890033-1. Geo-ecological risks and extreme natural phenomena of Siberia and the Far East and the Baikal project.

For citation: Voronina Yu. S., Plusnin A. M. Content of Rare Earth Elements in Snow Cover in the Area of the Dzhidinsky Mining and Processing Plant. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografia. Geoekologia*, 2023, no. 2, pp. 122-132. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/2/122-132>

REFERENCES

1. Chudaeva V.A., Chudaev O.V. Osobennosti nakopleniya i fraksionirovaniya redkozemel'nykh elementov v poverkhnostnykh vodakh Dal'nego Vostoka v usloviyakh prirodnykh i antropogennykh anomalii [Features of accumulation and fractionation of rare earth elements in the surface waters of the Far East under conditions of natural and anthropogenic anomalies]. *Geokhimiya*, 2011, no. 5, pp. 523-549. (In Russ.)
2. Dzhidinskaya zona – fragment Paleoziat'skogo okeana [Dzida zone – a fragment of the Paleosianic Ocean] / A. I. Al'mukhamedov, I. V. Gordienko, M. I. Kuz'min i dr. *Geotektonika*, 1996, no. 4, pp. 25-42. (In Russ.)
3. Dzhidinskiy rudnyy rayon: geologicheskoe stroenie, strukturno-metallogenicheskoe rayonirovanie, geneticheskie tipy rudnykh mestorozhdeniy, geodinamicheskie usloviya ikh obrazovaniya, prognozy i perspektivy osvoeniya [Dzhidinsky ore district: geological structure, structural and

© Voronina Yu. S., Plusnin A. M., 2023

✉ Yulia S. Voronina, e-mail: u_voronina96@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

metallogenic zoning, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecasts and prospects for development] / I.V. Gordienko, D.V. Gorokhovskiy, O.K. Smirnova i dr. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 3-37. (In Russ.)

4. Geokhimiya redkozemel'nykh elementov v podzemnykh vodakh Sikhote-Alinskoy skladchatoy oblasti (Dal'niiy Vostok Rossii) [Geochemistry of rare earth elements in the underground waters of the Sikhote-Alinsky folded region (Far East of Russia)] / N.A. Kharitonova, E.A. Vakh, G.A. Chelnokov i dr. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2016, no. 2, pp. 68-82. (In Russ.)

5. Geologiya i poleznye iskopaemye Dzhidinskogo rudnogo rayona [Geology and minerals of the Dzhida ore district] / Khodanovich P. Yu., Smirnova O. K., Astashkov G. F. i dr. *Dzhidinskiy rudnyy rayon*, 1984, pp. 21-35. (In Russ.)

6. Issledovanie nerastvorimykh chastits v snezhnom pokrove Zapadnoy Sibiri na profile ot Tomsk do estuariya Obi [Study of insoluble particles in the snow cover of Western Siberia on the profile from Tomsk to the Ob estuary] / V.P. Shevchenko, S.N. Vorob'ev, S.N. Kirpotin i dr. *Optika atmosfera i okeana*, 2015, no. 6, pp. 499-504. (In Russ.)

7. Kozhevnikova N.M. Issledovanie kinetiki i ravnovesiya sorbtzii ionov prazeodima (III) prirodnykh mordenit-soderzhashchim tufom [Investigation of kinetics and equilibrium of sorption of praseodymium (III) ions by natural mordenite-containing tuff]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 335-338. (In Russ.)

8. Kozhevnikova N.M., Vambueva S.A. Raspredele-nie valovogo sodержaniya i podvizhnykh form lantana, tseriya, neodima i samariya v profile borovogo peska Zabaykal'ya [Distribution of the gross content and mobile forms of lanthanum, cerium, neodymium and samarium in the profile of boron sand of Transbaikalia]. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN*, 2014, no. 1, pp. 117-119. (In Russ.)

9. Pigareva N.N., Ubugunov L.L., Kozhevnikova N.M. Soderzhanie redkozemel'nykh elementov tserievoy podgruppy (La, se, Nd, Sm) v merzlotnykh pochvakh Buryatii [The content of rare earth elements of the cerium subgroup (La, ce, Nd, Sm) in permafrost soils of Buryatia]. *Agrokhimiya*, 2018, no. 12, pp. 60-68. (In Russ.)

10. *Prikaz Ministerstva sel'skogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 13.12.2016 g. № 552 «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya»* [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 dated December 13, 2016 "On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance"]. (In Russ.)

10. Redkie zemli v poverkhnostnykh i podzemnykh vodakh na territorii razmeshcheniya vol'framdobyvayushchego proizvodstva Zabaykal'ya [Rare earths in surface and un-

derground waters on the territory of the location of the tungsten mining production of Transbaikalia] / A.M. Plyusnin, V.V. Dabaeva, D.I. Zhambalova i dr. *Geokhimiya*, 2020, vol. 65, no. 7, pp. 711-728. (In Russ.)

11. Redkozemel'nye elementy v podzemnykh vodakh Tomskogo vodozabora [Rare earth elements in the underground waters of the Tomsk water intake] / V.K. Popov, E.Yu. Pasechnik, P.I. Protsenko, O.Yu. Goncharov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 97-105. (In Russ.)

12. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Gidrogeokhimiya redkozemel'nykh elementov tekhnogennoy zony gipergeneza otrabotannogo mednokolchedannogo rudnika [Hydrogeochemistry of rare earth elements of the technogenic hypergenesis zone of a spent copper-crusted mine]. *Materialy tret'ey Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami»*, 2018, pp. 370-374. (In Russ.)

13. Semenova I.N., Abdullina L.A. Rafikova Yu.S. Zagryaznenie ob'ektov okruzhayushchey sredy v zone vliyaniya Buribaevskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata i pokazateli zaboлеваemosti naseleniya [Pollution of environmental objects in the zone of influence of the Buribaevsky mining and processing plant and indicators of morbidity of the population]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2011, no. 10, pp. 558-560. (In Russ.)

14. Shumilova M.A., Sadiullina O.V., Petrov V.G. Issledovanie zagryaznennosti snezhnogo pokrova na primere goroda Izhevsk [Study of insoluble particles in the snow cover of Western Siberia on the profile from Tomsk to the Ob estuary]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*, 2012, no. 2, pp. 83-87. (In Russ.)

15. Smirnova O.K., Plyusnin A.M. *Dzhidinskiy rudnyy rayon (problemy sostoyaniya okruzhayushchey sredy)* [Dzhidinsky ore district (environmental problems)]. Ulan-Ude: Izdatel'stvo BNTs SO RAN, 2013. 181 p. (In Russ.)

16. Timofeev I.V., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. Geokhimiya pochvennogo pokrova gornopromyshlennykh landshaftov na yugo-zapade Zabaykal'ya (gorod Zakamensk) [Geochemistry of the soil cover of mining landscapes in the south-west of Transbaikalia (the city of Zakamensk)]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2016, no. 3, pp. 49-61. (In Russ.)

17. Zhavoronkin O.V. Neotektonicheskaya struktura dzhidinskogo sinklinoriya po dannym mofometriceskogo analiza [Neotectonic structure of the Djida synclinorium according to the data of the mofometric analysis]. *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov «Geologi XXI veka»*, 2003, pp. 14-16. (In Russ.)

18. Bidday R., Cidu R., Frau F. Rare earth elements in waters in albitite – bearing granodiorites of Central Sardinia, Italy. *Chemical Geology*, 2002, vol.182, pp. 1-14.

19. Byrne R.H., Kim K.N. Rare earth elements scavenging in seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, no. 54, pp. 2645-2656.

20. Duncan T., Shaw T.J. The mobility of rare earth elements and redox sensitive elements in the groundwater/seawater mixing zone of a shallow coastal aquifer. *Aquat Geochim*, 2003, vol. 9, pp. 223-255.

21. Origin of rare earth elements signatures in groundwaters of circumneutral pH from southern Nevada and eastern California, USA / K.H. Johannesson, X. Zhou, C. Guo, K.J. Stetzenbach, V.F. Hodge. *Chemical Geology*, 2000, vol. 164, pp. 239- 257.

22. Rare earth elements in chloride-rich groundwater, Palo Duro Basin, Texas, USA / D.C. Gosselin, M.R. Smith, E.A. Lepel, J.C. Laul. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, vol. 56, pp. 1495-1505.

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 27.06.2022

Accepted: 05.06.2023

Воронина Юлия Сергеевна

Аспирант Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, ORCID: 0009-0008-5272-1420, e-mail: u_voronina96@mail.ru

Плюснин Алексей Максимович

доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Гидрогеологии и Геоэкологии Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-9380-7281, e-mail: plyusnin-53@mail.ru

Yulia S. Voronina

Postgraduate student at the N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, ORCID: 0009-0008-5272-1420, e-mail: u_voronina96@mail.ru

Alexey M. Plyusnin

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology of the N.L. Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9380-7281, e-mail: plyusnin-53@mail.ru