Серия «Науки о Земле»
2025. Т. 52. С. 97–107
Онлайн-доступ к журналу:
http://izvestiageo.isu.ru/ru

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 550.4.02+553.3/.4+502.5 (571.55)
https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.52.97

Экспериментальное моделирование гипергенных процессов как метод геоэкологических исследований на примере месторождения Ключевское

Е. С. Эпова*

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия

Аннотация. Методами экспериментального моделирования определен спектр подвижных элементов в зоне гипергенеза Ключевского золоторудного месторождения, полученные результаты соотнесены с содержаниями в природных водах месторождения и имеющимися литературными данными. Полученные данные состава руд соотносились с распространенными минеральными ассоциациями на основе литературных данных. Результаты экспериментальных растворов соотнесены с содержаниями в природных водах месторождения. Сравнительный анализ показал высокое сходство по физико-химическим характеристикам у модельных растворов и природных вод на месторождении, что может свидетельствовать о правомерности использования экспериментального моделирования процессов гипергенного выщелачивания руд сульфидных месторождений в целях геоэкологического прогноза преобразования природно-техногенных геосистем.

Ключевые слова: геохимия окружающей среды, зона гипергенеза, сульфидные месторождения, экспериментальное моделирование, геоэкологическое прогнозирование.

Для цитирования: Эпова Е. С. Экспериментальное моделирование гипергенных процессов как метод геоэкологических исследований на примере месторождения Ключевское // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 52. С. 97–107. https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.52.97

Original article

Experimental Modelling of Hypergenic Processes as a Method of Geoecological Research on the Example of the Kliuchevskoye Deposit

E. S. Epova*

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russian Federation

Abstract. The spectrum of mobile elements in the hypergenesis zone of the Kliuchevskoe gold deposit has been determined by experimental modelling methods, and the results obtained have been correlated with the contents in the natural waters of the deposit. Significant transition of As, Ca, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Zn in the mobile state explains their participation in the formation of hypergene minerals (such as scorodite, malachite, azurite, chalcantite, goethite, cerussite, epsomite, etc.), as well as their inclusion in them as impurities, or isomorphically replacing the main metal. At the Kliuchevskoe deposit the oxidation zone is quite widely developed, which creates conditions for

© Эпова Е. С., 2025

* Полные сведения об авторе см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

migration of potentially hazardous elements, and high content of heavy metals in natural waters of the deposit testify to intensive oxidation processes at the deposit at present. Comparative analysis of the obtained data showed high similarity in chemical characteristics of model solutions and natural waters at the deposit, which may indicate the legitimacy of the use of experimental modelling of the processes of hypergenic leaching of ores of sulphide deposits as one of the methods of geoecological forecasting of the transformation of natural-technogenic geosystems. Thus, experimental modelling may well serve as one of the methods of geoecological research.

Keywords: environmental geochemistry, zone of hypergenesis, sulfide deposits, experimental modeling, geoecological forecasting.

For citation: Epova E.S. Experimental Modelling of Hypergenic Processes as a Method of Geoecological Research on the Example of the Kliuchevskoye Deposit. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences,* 2025, vol. 52, pp. 97-107. https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.52.97 (in Russian)

Введение

Экспериментальное моделирование в геохимии – направление давно известное [Птицын, Колонин, Барановская, 1983; Иванов, Базарова, 1985; Особенности криогеохимических процессов … , 2006; Зонхоева, 2010; Эпова, 2013; Mobility of Po … , 2014], но в свете новой парадигмы устойчивого развития общества этот метод может использоваться и в геоэкологических исследованиях. Экспериментальное моделирование геохимических процессов дает вполне четкую характеристику состояния территории при заданных условиях и позволяет заглянуть дальше – спрогнозировать будущие процессы геохимического преобразования.

Золоторудное месторождение Ключевское находится на юге Ключевского рудного поля, расположенного в южной части Алдано-Становой области, территориально в 45 км юго-западнее административного центра Могочинского района Забайкальского края в пределах поселка городского типа (пгт) Ключевского [Геологические исследования … , 1999].

Зона окисления на месторождении Ключевское достаточно широко развита, и ее мощность до разработки составляла в среднем 30–40 м, в некоторых местах доходя до 100 м [Криволуцкая, Гонгальский, 1995]. Развитие зоны окисления достаточно хорошо видно по бортам карьера (рис. 1). Широкое распространение гипергенных процессов в рудах и породах месторождения Ключевское позволяет смоделировать возможный состав кислых рудничных растворов и их влияние на компоненты ландшафта.

Доступ к открытой рудной поверхности сульфидных месторождений грунтовых и поверхностных вод, свободного кислорода воздуха приводит к образованию серной кислоты и формированию кислых дренажных растворов до pH = 2 и ниже, что является благоприятным условием для образования ореолов рассеивания рудных элементов [Nordstrom, 1982; Microbial ecology … , 2010; Mobility of Po … , 2014; Geochemical and mineralogical … , 2023]. Кислый рудничный дренаж является агрессивным агентом, способствующим извлечению макро- и микроэлементов при взаимодействии с дроблеными массивами руд и пород и их дальнейшей миграции [Thomas, Sheridan, Holm, 2023; Effects of lithology … , 2023; Hajihashemi, Rajabpoor, Schat, 2023; Spatiotemporal evolution … , 2023].

Рис. 1. Проявления гипергенных процессов по западному борту карьера Ключевское

Таким образом, характерной особенностью горнопромышленных геосистем являются повышенные содержания рудных элементов в разных компонентах природной среды и, как следствие, их вовлечение в биогеохимические круговороты [Immobilization of metal(loid)s … , 2023; Hajihashemi, Rajabpoor, Schat, 2023; Transport and fate … , 2023; Coal-source acid mine … , 2023]. Активная миграция рудных элементов с поверхностными водами способствует увеличению площади геохимической аномалии и может привести к дальнейшей деградации ландшафта.

Целью данного исследования является изучение возможности применения экспериментального моделирования процессов выщелачивания сульфидных руд для выявления интенсивности геохимического преобразования территории при разработке месторождений.

Материалы и методы

В лабораторном изучении взаимодействия руд с сернокислотными растворами ставились стационарные и динамичные эксперименты при стандартных условиях, что давало возможность сопоставить данные состава сернокислотных растворов, полученных опытным путем со стоячими (воды карьера месторождения Ключевское) и проточными (ручей в штольне) водами месторождения.

Для экспериментов использовалась измельченная просеянная руда из карьера месторождения размерностью –2,5+1 мм. Разделение на классы проводилось методом расситовки с помощью вибропривода ВП-30Т (Россия) и набора стальных перфорированных сит. Рудные навески перед выщелачиванием промывались дистиллированной водой и просушивались в сушильном шкафу при температуре 90 °С.

Динамичные эксперименты (рис. 2) проводились в шприцах объемом 20 мл. Через навеску руды массой 40 г пропускался поток сернокислотного раствора объемом 400 мл, подаваемый с помощью перистальтического насоса Peristaltic pump type pp1-05 (Польша) с заданной скоростью (υ = 3 мл/мин), профильтрованный раствор отбирался в пробирки по 20 мл для определения изменения уровня кислотности и проведения химического анализа.

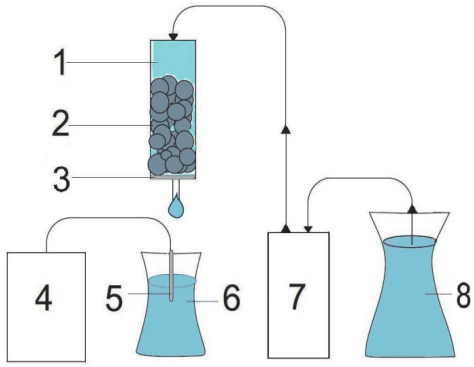

Рис. 2. Условная схема динамичного эксперимента:
1 – фильтрационная колонка, *2* – навеска руды, *3* – фильтр, *4* – pH-метр, *5* – комбинированный электрод, *6* – фильтрат, *7* – перистальтический насос, *8* – исходный раствор

Динамичные и стационарные эксперименты проводились при соотношениях твердая фаза : жидкость = 1:10 в трех повторах, средние значения которых использовались в графических представлениях. По условиям стационарных экспериментов в 100 мл сернокислого раствора помещалась навеска руды 10 г, после чего сосуд закрывался и неподвижно хранился три месяца.

Кислотность исходного (pH = 2) и профильтрованного сернокислотного раствора определялась потенциометрическим методом с использованием pH-метра «Анион-7000» (Россия) с комбинированным электродом марки ЭСР10601/4. Для проведения pH-метрии требовалась подготовка комбинированного электрода – вымачивание в течение суток в 0,1 Н растворе HCl, который готовился с помощью стандарт-титра. Калибровка электрода проводилась буферными растворами, приготовленными из стандарт-титров со значениями pH = 1,86; pH = 4,01; pH = 6,86.

Исходный раствор готовился с использованием дистиллированной воды и H_2SO_4 марки «ч.д.а.». Состав руд и отработанных растворов определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрофотометре Perkin Elmer Optima 5300 DV (США) в аккредитованной лаборатории ЗАО SGS Vostok Limited.

Результаты и обсуждение

В рудных телах месторождения Ключевское доля сульфидов представляет в среднем от 20 до 80 %. Основной сульфидный минерал – пирит, остальные относятся к второстепенным. Преобладают кварц-сульфидные и

кварц-турмалин-сульфидные ассоциации. При этом последняя отличается наличием тонкого (0,1 мм) самородного золота, сосредоточенного главным образом в пирите. В сульфидно-полиметаллической ассоциации отмечено снижение содержаний серебра при увеличении золота. Пирит в составе последней содержит, в %: As 0,1–1,0, Cu 0,1–1,0, Co 0,1, Bi 0,001–0,02; Au 5–20 г/т, Ag 1–30 г/т. В халькопирите содержится, в %: As 0,1–0,7, Bi 0,0001–0,005, Zn 0,007–0,05, Sb 0,1–0,2, Pb 0,001–0,01; Au 10–50 г/т, Ag 20–100 г/т [Криволуцкая, Гонгальский, 1995].

По результатам анализов отобранных образцов руды (табл. 1, 2) из общего содержания серы (31,6 %), в виде сульфатов (SO_4^{2-}) определено 1,3 %, соответственно на сульфидную серу приходится порядка 30 %. Кроме того, о высоком содержании сульфидов говорит и высокое содержание железа. Присутствие карбонатов (CO_3^{2-}) в целом незначительно и варьируется от 0,05 до 0,35 % из общего содержания углерода 0,4 %.

Таблица 1

Макрокомпонентный состав руд месторождения Ключевское (силикатный анализ)

Оксид элемента	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	MgO	MnO	P_2O_5	TiO_2	SiO_2
Содержание, %	6,48	1,16	42,47	0,78	0,62	1,69	0,03	0,05	0,13	18,4

Таблица 2

Макро- и микрокомпонентный состав руд месторождения Ключевское (кларк земной коры приведен по [Ярошевский, 2006])

Элемент	As	Sb	Bi	Cu	Zn	Pb	Mo	Ni	Co
Содержание, г/т	**30500**	**610**	**100**	**2950**	**160**	**810**	**30**	40	**50**
Кларк, г/т	1,7	0,5	0,009	47	83	16	1,1	58	18
Элемент	Cr	Li	Sr	V	W	Pt	Au	Se	Te
Содержание, г/т	40	20	220	30	**160**	0,01	**9,82**	**36,4**	**3,1**
Кларк, г/т	83	32	340	90	1,3	–	0,0043	0,05	0,001

В рудах значительно превышают значения кларка земной коры в основном элементы, содержащиеся в сульфидах – Cu, Zn, Pb, Mo, Co, As, Sb, Bi, а также W, Au, Te и Se, как видно из табл. 2. При этом наибольшую опасность в плане экологического загрязнения территории представляют элементы пятой группы второй подгруппы таблицы Д. И. Менделеева – As, Sb и Bi. Распределение основных потенциально опасных элементов в рудных и гипергенных минеральных ассоциациях представлено в табл. 3. Повышенные концентрации селена и теллура в рудах может быть связано с тем, что золото и серебро содержится в теллуридах, к примеру в петците (Ag_3AuTe_2) и гессите (Ag_2Te), которые были отмечены в рудах месторождения [Криволуцкая, Гонгальский, 1995].

Минералы приведены по данным [Криволуцкая, Гонгальский, 1995; Криволуцкая, 1996][1].

[1] Возможные примеси приведены по: The EUROMIN project. URL: https://euromin.w3sites.net/mineraux/ (accessed 25.09.2023) ; WWW-MINCRIST. Crystallographic and Crystallochemical Database for minerals and their structural analogues. URL: http://mincryst.iem.ac.ru/rus/search.php?select=Name (date of access: 25.09.2023).

Таблица 3

Распределение элементов в рудных и гипергенных минеральных ассоциациях на месторождении Ключевское

Элемент	Рудные минералы	Минералы зоны окисления
Fe	Пирит (**Fe**S_2) примеси – Co, Ni, As, Cu, Au, Se; гематит (**Fe**$_2O_3$) примеси – Ti, Al, Mn, H_2O	Ярозит (K**Fe**$^{3+}{}_3[SO_4]_2[OH]_6$) Гетит (**Fe**O(OH))
As, Sb	Арсенопирит (Fe**As**S) примеси – Co, Ni; энаргит (Cu_3**As**S_4) примеси – Sb, Fe, Pb, Zn, Ag, Ge; теннантит (Cu_{12}**As**$_4S_{13}$) примеси – Sb, Bi, Pb; антимонит (Sb_2S_3) примеси – Bi, Se; тетраэдрит ($(Cu,Fe,Zn)_{12}(Sb,As)_4S_{13}$) примеси – Ag, Hg, Co, Ni, Pb, As, Bi, Te, Se	Скородит (Fe^{3+}**As**$O_4 \cdot 2H_2O$)
Bi	Фрейбергит ($Ag_6Cu_4Fe_2Sb_4S_{13}$) примеси – Zn, Hg, **Bi**; бенджаминит (Ag_3**Bi**$_7S_{12}$)	Базобисмутин (**Bi**$_2O_2(CO_3)$)
Cu	Халькопирит (**Cu**Fe**S**$_2$) примеси – Ag, Au, In, Tl, Se, Te	Халькантит (**Cu**$SO_4 \cdot 5H_2O$), Азурит (**Cu**$_3(CO_3)_2(OH)_2$), Малахит (**Cu**$_2CO_3(OH)_2$), Халькозин (**Cu**$_2$S) – вторичное сульфидное обогащение
Pb	Галенит (**Pb**S) примеси – Ag, Cu, Fe, Bi	Церрусит (**Pb**$[CO_3]$)
Zn	Сфалерит (**Zn**S) примеси – Mn, Cd, Hg, In, Tl, Ga, Ge, Sb, Sn, Pb, Ag	Смитсонит (**Zn**CO3)
Ca, Na, Mg	Сфен (**Ca**,Ti$[SiO_4]$O) примеси – Fe, Y, Mn, Al, Ce, Sr, **Na**, Nb, Ta, Al, **Mg**, V, F, Zr, Sn; рутил (TiO_2) примеси – Fe, Ta, Nb, Cr, V, Sn	Бейделлит (N**a,Ca**$)_{0.3}Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ Эпсомит (**Mg**$SO_4 \cdot 7H_2O$)

Таким образом, активное протекание окислительных процессов на поверхности и в рудной толще месторождения, а также наличие минеральных ассоциаций гипергенного происхождения подтверждают включение большинства из вышеуказанных элементов в миграционные пути и, соответственно, их потенциальную опасность для биотических компонентов ландшафта при включении в биогеохимические циклы.

Исходя из геохимических преобразований сульфидных руд месторождения и согласно табл. 3, ясно, что в кислых сульфатных растворах активно мигрируют, помимо основных металлов – Cu, Zn, Pb, Co, Ni и т. п., высокотоксичные элементы пятой группы (As, Sb, Bi). Концентрации этих элементов в фильтрационных растворах динамичных и стационарных экспериментов подтверждают активное извлечение вышеуказанных элементов и их переход в миграционную форму.

Стационарные эксперименты показали интенсивное снижение кислотности исходного раствора (до pH = 7,5), в связи с чем в отобранных пробах отмечено присутствие Sb в концентрации 0,1 мг/дм³, что определяется хорошей миграцией сурьмы преимущественно в щелочных условиях. Также были отмечены более низкие значения концентраций некоторых элементов, чем в динамичных экспериментах, в том числе: Fe, Cu, As, Pb и Zn (рис. 3). Исключение составляют Ca, Mg, содержание которых сравнимо с концентрациями в первых пробах динамичных экспериментов и равно 167 мг/дм³ для Ca и 73 мг/дм³ для Mg.

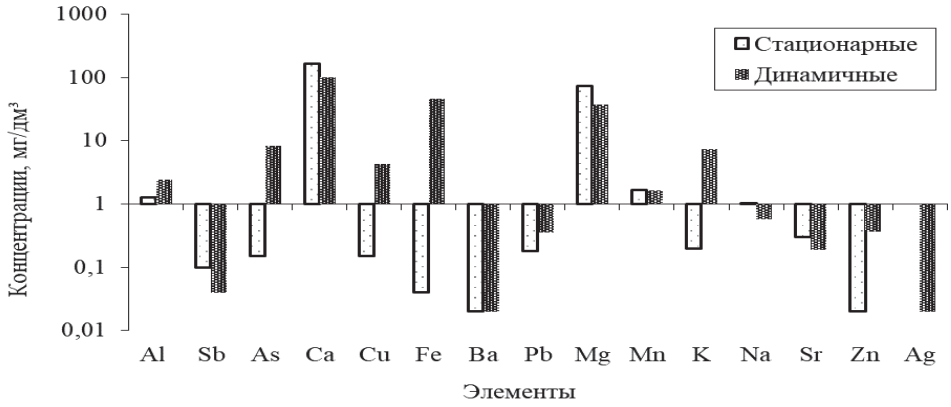

Рис. 3. Разность концентраций элементов в растворах в зависимости от типа эксперимента

На диаграммах сравнения химического состава модельных растворов и поверхностных вод месторождения (рис. 4, 5) видна близость содержаний элементов в природных водах и фильтратах экспериментов (табл. 4). Исключение составляют концентрации меди и железа в динамичных экспериментах и водах штольни, но здесь стоит помнить, что подвижность железа во многом определяется окислительно-восстановительными условиями среды, а не только ее кислотностью. Кроме того, не стоит забывать, что железо – очень хороший комплексообразователь, который может осаждаться как в катионных, так и в анионных комплексах. Что, в свою очередь, может способствовать дальнейшему осаждению других элементов. Осаждение железа с течением времени наглядно представлено на втором графике сравнения стационарных экспериментов и карьерных вод (рис. 3, 5).

Незначительные расхождения в концентрациях халькофильных элементов в экспериментальных растворах и водах штольни определяются, скорее всего, их быстрым осаждением в естественных условиях при незначительном разбавлении кислых вод и снижении кислотности. Так, медь и свинец осаждаются уже при pH = 4,5. Кроме того, повышение pH ручья штольни может происходить при протекании в породах, содержащих карбонаты, частично нейтрализующих серную кислоту. Хоть содержание карбонатов в рудах и невелико, но они там имеются, например кальцит ($CaCO_3$), доломит ($CaMg[CO_3]_2$).

Таблица 4

Сравнение содержаний элементов (в мг/дм³) в экспериментальных растворах и природных водах месторождения Ключевское

Элементы	Al	As	Ca	Cu	Fe	Sr	Pb	Mg	Mn	K	Na	Zn
Динамичные эксперименты	2,4	0,8	101	0,9	46	1,9	0,4	38	1,7	7,5	5,8	0,4
Ручей в штольне	2,5	0,07	284	0,01	0,4	1,7	0,03	197	6,9	5,3	8,7	0,5
Стационарные эксперименты	1,3	0,15	167,2	0,15	0,04	0,3	0,18	73	0,3	0,4	1	0,2
Озеро карьера	0,05	0,04	95,9	0,05	0,05	0,7	0,03	64,2	0,2	4,5	4,9	0,2

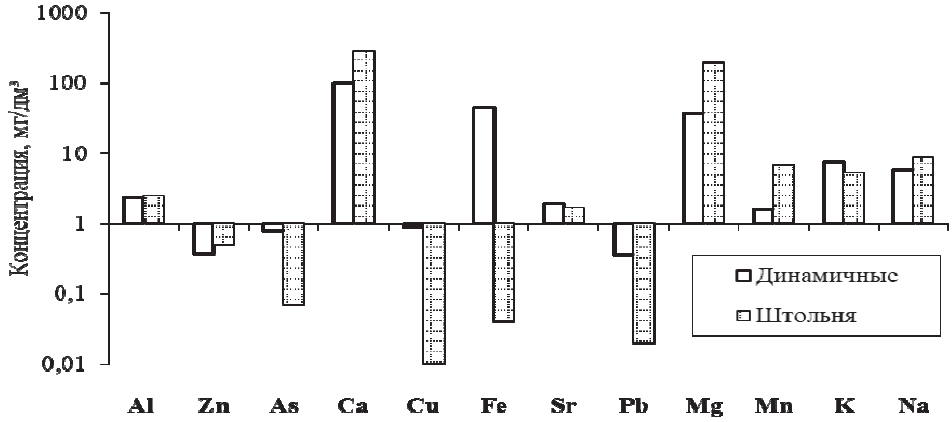

Рис. 4. Сравнительная диаграмма выноса микроэлементов в динамических экспериментах и воды из штольни

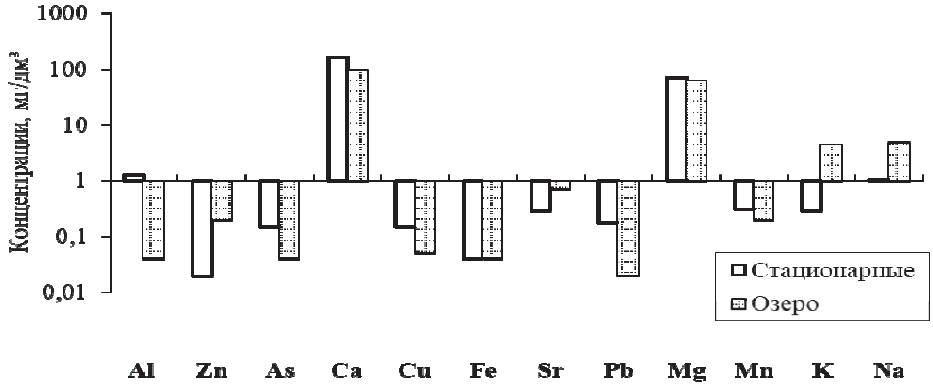

Рис. 5. Сравнение содержания элементов в растворе после стационарных экспериментов и в озере карьера

Основные выводы

• Зона окисления на месторождении Ключевское достаточно широко развита, что видно на срезе пород по бортам карьера, а высокие содержания тяжелых металлов в природных водах месторождения свидетельствуют об

интенсивном протекании окислительных процессов на месторождении в настоящее время.

• Значительный переход таких элементов, как As, Ca, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Zn, в подвижное состояние обусловливает их участие в образовании гипергенных минералов (таких как скородит, малахит, азурит, халькантит, гетит, церуссит, эпсомит и пр.), а также включение в них в качестве примесей, либо изоморфно замещая основной металл.

• Сравнительный анализ показал высокое сходство по физико-химическим характеристикам экспериментальных растворов и природных вод месторождения, что может свидетельствовать о правомерности использования экспериментального моделирования процессов сернокислотного выщелачивания руд сульфидных месторождений, как один из методов геоэкологического прогноза преобразования территории. Таким образом, экспериментальное моделирование вполне может служить одним из методов геоэкологических исследований.

Список литературы

Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья: История, современное состояние, проблемы, перспективы развития. Новосибирск : Наука. Сиб. издат. фирма РАН, 1999. С. 287–289.

Зонхоева Э. Л. Комплексное исследование цеолитсодержащего сырья // Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 6. С. 36–39.

Иванов А. В., Базарова В. Б. Химическое выветривание пирита с водой и различными водными растворами при положительных и отрицательных температурах // Миграция химических элементов в криолитозоне. Новосибирск : Наука, 1985. С. 115–123.

Криволуцкая Н. А., Гонгальский Б. И. Ключевское месторождение // Месторождения Забайкалья. Т. 1, кн. 2. М. : Геоинформмарк, 1995. С. 33–40.

Криволуцкая Н. А. Парагенетические ассоциации минералов и условия образования руд Ключевского месторождения золота (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38, № 4. С. 344–361.

Птицын А. Б., Колонин Г. Р., Барановская Т.К. Экспериментальное и термодинамическое исследование новых вариантов гидрометаллургического извлечения меди из Удоканского месторождения. // Геология рудных месторождений зоны БАМ. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1983. С. 164–172.

Особенности криогеохимических процессов в зоне окисления сульфидных месторождений (по экспериментальным данным) / А. Б. Птицын, Т. И. Маркович, В. А. Павлюкова, Е. С. Эпова // Доклады Академии наук. 2006. Т. 411, № 3. С. 381–383.

Эпова Е. С. Криогеохимия зоны окисления сульфидного месторождения Удокан (Восточное Забайкалье) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 553. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=10745 (дата обращения: 25.09.2023).

Ярошевский А. А. Распространенность химических элементов в земной коре // Геохимия. 2006. № 1. С. 80–102.

Coal-source acid mine drainage reduced the soil multidrug-dominated antibiotic resistome but increased the heavy metal(loid) resistome and energy production-related metabolism / Q. Huang, Z. Liu, Y. Guo [et al.] // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 873. 162330. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162330

Effects of lithology and acid mine drainage on Cd concentration and isotope distribution in a large riverine system, Guangxi Province, South China / Z. Zhou, H. Wen, C. Zhu [et al.] // Chemical Geology. 2023. Vol. 634. 121571. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121571

Hajihashemi S., Rajabpoor S., Schat H. Acid mine drainage (AMD) endangers pomegranate trees nearby a copper mine // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 889. 164269. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164269

Immobilization of metal(loid)s from acid mine drainage by biological soil crusts through biomineralization / X. Kuang, L. Peng, Sh. Chen [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 443. Part B. 130314. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130314

Microbial ecology of Río Tinto, a natural extreme acidic environment of biohydrometallurgical interest / E. González-Toril, A. Aguilera, N. Rodriguez [et al.] // Hydrometallurgy. 2010. Vol. 104, Iss. 3–4. P. 329–333. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.011

Mobility of Po and U-isotopes under acid mine drainage conditions: an experimental approach with samples from Río Tinto area (SW Spain) / L. Barbero, M. J. Gázquez, J. P. Bolívar [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol. 138. P. 384–389. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.004

Nordstrom D. K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals // Acid sulfate weathering. 1982. Vol. 3. P. 37–39.

Spatiotemporal evolution of U and Th isotopes in a mine effluent highly polluted by Acid Mine Drainage (AMD) / J. L. Guerrero, N. Suárez-Vaz, D. C. Paz-Gómez [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 447. 130782. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130782

Thomas G., Sheridan C., Holm P. E. Arsenic contamination and rare earth element composition of acid mine drainage impacted soils from South Africa // Minerals Engineering. 2023. Vol. 203. 108288. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108288

Transport and fate of Cu and Cd in contaminated paddy soil under acid mine drainage / Y. Pan, H. Ye, Y. Yang [et al.] // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 334. 117517. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117517

Geochemical and mineralogical aspects of acid mine drainage associated with 100 years of coal mining in the arctic, Svalbard (78°N) / C. Zwahlen, A. Rehn, T. Aiglsperger, B. Dold // Journal of Geochemical Exploration. 2023. Vol. 252. 107266. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107266

References

Geologicheskie issledovanija i gorno-promyshlennyj kompleks Zabajkalija: Istorija, sovremennoe sostojanie, problemy, perspektivy razvitija [Geological Research and Mining-Industrial Complex of Transbaikalia: History, Current State, Problems, Development Prospects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999, pp. 287-289. (in Russian)

Zonhoeva Je.L. Kompleksnoe issledovanie ceolitsoderzhashhego syrija [Comprehensive study of zeolite-containing raw materials]. *Bezopasnost zhiznedejatelnosti* [Life Safety], 2010, no. 6, pp. 36-39. (in Russian).

Ivanov A.V., Bazarova V.B. Himicheskoe vyvetrivanie pirita s vodoj i razlichnymi vodnymi rastvorami pri polozhitelnyh i otricatel'nyh temperaturah [Chemical weathering of pyrite with water and various aqueous solutions at positive and negative temperatures]. *Migracija himicheskih jelementov v kriolitozone* [Migration of chemical elements in cryolithozone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, pp. 115-123. (in Russian)

Krivoluckaja N.A., Gongal'skij B.I. Kljuchevskoe mestorozhdenie [Kliuchevskoye deposit]. *Mestorozhdenija Zabajkalija* [Deposits of Transbaikalia], vol. 1, no. 2, Moscow, Geoinformmark Publ., 1995, pp. 33-40. (in Russian)

Krivoluckaja N.A. Parageneticheskie associacii mineralov i uslovija obrazovanija rud Kljuchevskogo mestorozhdenija zolota (Vostochnoe Zabajkal'e, Rossija) [Paragenetic associations of minerals and conditions of ore formation of the Kliuchevskoye gold deposit (Eastern Transbaikalia, Russia)]. *Geologija rudnyh mestorozhdenij* [Geology of ore deposits], 1996, vol. 38, no. 4, pp. 344-361. (in Russian).

Pticyn A.B., Kolonin G.R., Baranovskaja T.K. Jeksperimentalnoe i termodinamicheskoe issledovanie novyh variantov gidrometallurgicheskogo izvlechenija medi iz Udokanskogo mestorozhdenija [Experimental and thermodynamic study of new variants of hydrometallurgical extraction of copper from Udokan deposit]. *Geologija rudnyh mestorozhdenij zony BAM* [Geology of ore deposits of the BAM zone]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, pp. 164-172. (in Russian)

Pticyn A.B., Markovich T.I., Pavljukova V.A., Epova E.S. Osobennosti kriogeohimicheskih processov v zone okislenija sul'fidnyh mestorozhdenij (po jeksperimental'nym dannym) [Peculiarities of cryogeochemical processes in the oxidation zone of sulphide deposits (based on experimental data)]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2006, vol. 411, no. 3, pp. 381-383. (in Russian)

Epova E.S. Kriogeohimija zony okislenija sul'fidnogo mestorozhdenija Udokan (Vostochnoe Zabajkal'e) [Cryogeochemistry of the oxidation zone of the Udokan sulphide deposit (Eastern Transbaikalia)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija* [Modern Problems of Science and Education], 2013, no. 5, art. 553. Available at: https://science-education.ru/ru/article/view?id=10745 (date of access: 25.09.2023) (in Russian)

Jaroshevskij A.A. Rasprostranjonnost himicheskih jelementov v zemnoj kore [Distribution of chemical elements in the Earth's crust]. *Geohimija* [Geochemistry], 2006, no. 1, pp. 80-102. (in Russian)

Huang Q., Liu Z., Guo Y., Li B. et al. Coal-source acid mine drainage reduced the soil multi-drug-dominated antibiotic resistome but increased the heavy metal(loid) resistome and energy production-related metabolism. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 873, art. 162330. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162330

Zhou Z., Wen H., Zhu C. et al. Effects of lithology and acid mine drainage on Cd concentration and isotope distribution in a large riverine system, Guangxi Province, South China. *Chemical Geology,* 2023, vol. 634, art. 121571. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121571

Hajihashemi S., Rajabpoor S., Schat H. Acid mine drainage (AMD) endangers pomegranate trees nearby a copper mine. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 889, 164269 p. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164269

Kuang X., Peng L., Chen Sh. et al. Immobilization of metal(loid)s from acid mine drainage by biological soil crusts through biomineralization. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 443, Part B, art. 130314. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130314

González-Toril E., Aguilera A., Rodriguez N. et al. Microbial ecology of Río Tinto, a natural extreme acidic environment of biohydrometallurgical interest. *Hydrometallurgy*, 2010, vol. 104, iss. 3–4, pp. 329-333. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.011

Barbero L., Gázquez M.J., Bolívar J.P. et al. Mobility of Po and U-isotopes under acid mine drainage conditions: an experimental approach with samples from Río Tinto area (SW Spain). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2014, vol. 138, pp. 384-389. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.004

Nordstrom D.K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *Acid sulfate weathering*, 1982, vol. 3, pp. 37-39.

Guerrero J.L., Suárez-Vaz N., Paz-Gómez D.C., Pérez-Moreno S.M., Bolívar J.P. Spatiotemporal evolution of U and Th isotopes in a mine effluent highly polluted by Acid Mine Drainage (AMD). *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 447, art. 130782. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130782

Thomas G., Sheridan C., Holm P.E. Arsenic contamination and rare earth element composition of acid mine drainage impacted soils from South Africa. *Minerals Engineering*, 2023, vol. 203, art. 108288. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108288

Pan Y., Ye H., Yang Y. et al. Transport and fate of Cu and Cd in contaminated paddy soil under acid mine drainage. *Journal of Environmental Management*, 2023, vol. 334, art. 117517. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117517

Zwahlen C., Rehn A., Aiglsperger T., Dold B. Geochemical and mineralogical aspects of acid mine drainage associated with 100 years of coal mining in the arctic, Svalbard (78°N). *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, vol. 252, art. 107266. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107266

Сведения об авторе

Эпова Екатерина Сергеевна
кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Россия, 672014 г. Чита ул. Недорезова, 16а
e-mail: apikur1@ya.ru

Information about the author

Epova Ekaterina Sergeevna
Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Junior Scientist
Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS
16a, Nedorezova st., Chita, 672014, Russian Federation
e-mail: apikur1@ya.ru

Коды научной специальности: **1.6.21, 1.6.3**
Статья поступила в редакцию **04.04.2024**; одобрена после рецензирования **03.06.2025**; принята к публикации **10.06.2025**
The article was submitted **April, 4, 2024**; approved after reviewing **June, 3, 2025**; accepted for publication **June, 10, 2025**