

УДК 550.4.02; 553.3/.4; 502.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4717
Шифр специальности ВАК: 1.6.21
Обзорная статья

Экспериментальное выщелачивание рудоносных пород Дарасунского месторождения золота

Е.С. Эпова✉, Г.А. Юргенсон, О.В. Еремин

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, г. Чита*

✉ apikur1@ya.ru

Аннотация. *Актуальность* данной работы определяется необходимостью понимания процессов геохимического преобразования руд при воздействии разных реактивных растворов, а также оценки возможного распространения ряда потенциально опасных элементов в компонентах ландшафта. Эффективность извлечения элементов при взаимодействии руд с разными реагентами может быть использована при разработке новых, более экологически безопасных технологических схем их добычи. *Цель.* Выявление комплекса элементов, переходящих в подвижное состояние при взаимодействии сульфидных руд Дарасунского месторождения с различными реагентами (H_2SO_4 , H_2O_2 , NH_4HCO_3). *Методы.* Экспериментального моделирования геохимического преобразования руд. *Результаты и выводы.* При взаимодействии руд с разными видами реагентов наиболее реактивным показал себя раствор серной кислоты, им в 2 раза интенсивнее извлекаются наиболее высокие концентрации элементов сульфидов (Cu, Pb, Zn, Ni, Sn, Cd, Sr, Co). Только этим реагентом извлекаются Y, Be, Ga и лантаноиды. Раствором гидрокарбоната аммония извлекается большее количество As, Sb, Bi, Ag, Rb, Cs, In, U и Th, чем серноокислотным, и только этим реактивом извлекаются Mo, Zr, P, Sc, Cr. В подвижное состояние переходят Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Te и Tl при взаимодействии с растворами серной кислоты и гидрокарбоната на руды, при этом в фильтрате перекиси водорода отсутствуют. Калий и натрий извлекаются только растворами перекиси водорода и серной кислоты примерно в равных концентрациях (коэффициент корреляции 0,99).

Ключевые слова: экспериментальное моделирование, выщелачивание рудоносных пород, миграция элементов, зона гипергенеза, Дарасунское месторождение золота

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания FUFР-2021-0005.

Для цитирования: Эпова Е.С., Юргенсон Г.А., Еремин О.В. Экспериментальное выщелачивание рудоносных пород Дарасунского месторождения золота // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 100–109. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4717

UDC 550.4.02; 553.3/.4; 502.5
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4717
Review article

Experimental leaching of ore-bearing rocks of the Darasun gold deposit

E.S. Epova✉, G.A. Yurgenson, O.V. Eremin

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Chita, Russian Federation*

✉ apikur1@ya.ru

Abstract. Relevance. The need to understand the processes of geochemical transformation of ores under the impact of different reactive solutions, as well as to assess the possible distribution of a number of potentially hazardous elements in landscape components. The efficiency of element extraction during the interaction of ores with different reagents can be used in the development of new, more environmentally friendly technological schemes for their extraction. **Aim.** To identify the com-

plex of elements that pass into a mobile state during the interaction of sulfide ores of the Darasun deposit with various reagents (H_2SO_4 , H_2O_2 , NH_4HCO_3). **Methods.** Experimental modeling of geochemical transformation of ores. **Results and conclusions.** At interaction of ores with different types of reagents the sulfuric acid solution proved to be the most reactive, it extracts the highest concentrations of sulfide elements (Cu, Pb, Zn, Ni, Sn, Cd, Sr, Co) two times more intensively. Only with this reagent Y, Be, Ga and lanthanides are extracted. Ammonium hydrogen carbonate solution extracts more As, Sb, Bi, Ag, Rb, Cs, In, U and Th than sulfuric acid solution, and only this reagent extracts Mo, Zr, P, Sc, Cr. Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Te and Tl pass into the mobile state when interacting with solutions of sulfuric acid and hydrogen carbonate on the ore, and hydrogen peroxides are absent in the filtrate. Potassium and sodium are extracted only by solutions of hydrogen peroxide and sulfuric acid in approximately equal concentrations (correlation coefficient 0.99).

Keywords: experimental modelling, leaching of ore-bearing rocks, element migration, hypergenesis zone, Darasun gold deposit

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the state assignment FUF-2021-0005.

For citation: Epova E.S., Yurgenson G.A., Eremin O.V. Experimental leaching of ore-bearing rocks of the Darasun gold deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 100–109. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4717

Введение

Дарасунское месторождение золота расположено в пределах поселка Вершино-Дарасунский Тунгокоченского района Забайкальского края.

Месторождение представляет собой системы кварцево-сульфидных жил, образовавшихся в процессе эволюции Дарасунской рудно-магматической системы, функционировавшей в период 174 ± 10 – 145 ± 4 млн л. н. [1].

В рудах месторождения определено более 100 минеральных видов. Отличительной чертой является высокое (15–60 %) содержание сульфидов (пирит, арсенопирит, халькопирит, галенит, сфалерит, пирротин и др.) и сульфосолей (бурнонит, тетраэдрит, фрейбергит, тетрадимит и др.). Главные рудные минералы: пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит, халькопирит, пирротин, бурнонит, блеклые руды (тетраэдрит, фрейбергит и др.); из них основные пирит (14 %), арсенопирит (12 %). Жильные минералы представлены кварцем (32 %), карбонатами (11 %), турмалином, хлоритом, мусковитом и другими.

Руды содержат в среднем 14,6–15,4 г/т золота при общей вариации от единиц до 500 г/т. Золото самородное мелкое и субмикроскопическое от 0,06–15 мкм до 2 мм. Основными носителями золота являются пирит (19,8 г/т), арсенопирит (37,3 г/т), халькопирит (84,6 г/т), сульфосоли (13,9 г/т). Однако золото не входит в состав этих минералов, а образует тончайшие включения в них в виде золота самородного различной пробы и электрума. Нередко Au находится в теллуридах – петците, калаверите, креннерите и др.

Окисление сульфидных минералов с участием воды и кислорода приводит к формированию сернокислотных рудничных растворов, преобразующих геохимическую обстановку горнорудной территории путем выноса ряда элементов из состава пород и руд [2–5]. Кислотность таких вод может иметь значения pH от 2 до 3 [4–10]. Кислые руд-

ничные воды несут с собой множество элементов, которые при попадании в различные компоненты ландшафта (почвы, растения) могут включаться в биогеохимические круговороты и представлять потенциальную опасность здоровью местного населения [11–19].

Однако не только сернокислотный дренаж способствует извлечению элементов из руд и пород в ландшафты, но также и другие геохимические обстановки, например окислительные процессы при отсутствии сульфидов в зонах аэрации, присутствие карбонатных пород и минералов или гидрокарбонатных растворов. Во многих технологических схемах извлечения ценных компонентов используются в качестве окислителей различные пероксиды, в том числе перекись водорода [20–26]. Часто в качестве реагентов используются карбонаты и гидрокарбонаты [27–32].

Целью настоящего исследования является изучение комплекса элементов, выщелачивающихся из руд Дарасунского месторождения при взаимодействии с различными реагентами (H_2SO_4 , H_2O_2 , NH_4HCO_3).

Материалы и методы

Для исследования использовалась усредненная проба, полученная из серии проб, отобранных из разных рудных тел Дарасунского месторождения золота. После дробления образцов отбиралась фракция 0,5–1 мм. Навески промывались дистиллированной водой от пыли, высушивались в сушильном шкафу при температуре 45 °С, затем по 40 г руды помещались в шприцы 20 мл, на выходе для фильтрации мелких частиц добавлен фильтр «красная лента».

Выщелачивание производилось тремя реагентами: сернокислотным раствором pH=2, имитирующим воздействие кислого рудничного дренажа, образующегося в результате окисления сульфидов; раствором перекиси водорода (H_2O_2) 5 % для со-

здания окислительных условий при отсутствии серы (S); раствором гидрокарбоната аммония (NH_4HCO_3) концентрацией 0,1 моль – имитация влияния карбонатов на процесс преобразования руд либо их взаимодействие с углекислым газом (CO_2). Для равномерной и постоянной подачи реагента использовался перистальтический насос «Peristaltic pump type pp1-05» (Польша), скорость протекания раствора через навеску 3 мл/мин. Кислотность исходного (рН=2) сернокислотного раствора определялась потенциометрическим методом с использованием рН-метра «Анион-7000» (Россия) с комбинированным электродом марки ЭСП10601/4. Фильтрат отбирался по 40 мл [33–35].

Золото в твердых пробах определялось пробирным анализом, концентрации остальных элементов в пробах руд, пород и профильтрованных растворов устанавливались методом масспектрометрии с индукционно связанной плазмой в аккредитованной лаборатории СЖС «Восток Лимитед». Все окислы силикатной группы определены методом ICP95A, а в форме элементов – ICM40B.

Исследования минерального состава проб выполнены в шлифах и аншлифах с помощью оптического поляризационного микроскопа AXIO ScopeAI и электронно-зондовым методом на растворе электронном микроскопе LEO 1430 VP (аналитик Е.А. Хромова, ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, руководитель лаборатории канд. техн. наук С.В. Канакин). Использовано более 800 точек измерения состава минералов и их ассоциаций.

Результаты

Химический состав руд представлен в табл. 1, 2.

Как видно из табл. 2, в целом в рудах Дарасунского месторождения превышают кларк земной коры концентрации халькофильных элементов (Cu, Zn, Cd, Pb, Mo, Sn, Ag, Au, As, S, Sb, Bi, Se, Te, In, Tl), что вполне объяснимо наличием большого количества сульфидов и других рудных минералов (табл. 3).

Детально изучен также минеральный состав руд и химический состав минералов, основных носителей халькофильных и сидерофильных химических элементов (табл. 3).

Обсуждение и заключение

Силикатный анализ показал существенное значение алюмосиликатной составляющей руд, входящей в состав силикатов (кварц, полевые шпаты, амфиболы, слоистые силикаты, турмалин, эпидот). Полевые шпаты представлены в основном микроклином, частично плагиоклазами. Из слоистых силикатов развиты мусковит, хлорит, каолинит. Присутствует также эпидот (алланит), отличающийся примесями редкоземельных элементов. Носителями щелочноземельных элементов являются карбонаты, представленные кальцитом, доломитом, реже – анкерит, а также апатит, эпидот, амфиболы. Основная часть халькофильных элементов связана с широко развитыми халькопиритом, сфалеритом, галенитом, а также различными редкими сульфосолями и сульфидами. Основными носителями серы являются пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит, висмутин и др. Вольфрам связан с шеелитом, а кобальт и никель – с сульфидами.

Руда отличается высоким содержанием мышьяка, основным носителем которого является арсенопирит. В меньшей мере мышьяк связан с сульфосолями. Носителями сурьмы также являются сульфосоли, прежде всего, буланжерит и фрайбергит. Высокие содержания висмута обусловлены широким развитием висмутита, козалинта, тетрадимита, частично он связан с галенитом, а также теллуриститом и цумоитом. Теллур связан с большим числом теллуридов (гессит, тетрадимит, пильзенит, алексит и др.). Часть теллура и селена связана с пиритом. Золото и серебро находятся как в виде золота самородного, электрума, так и в виде их сульфидов и сульфосолей (ютенбогаардтит, фрейбергит и др.).

Таблица 1. Силикатный анализ руд месторождения Дарасунское, %

Table 1. Silicate analysis of ores of Darasun deposit, %

Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	MnO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	SiO_2	TiO_2	Cr_2O_3	S
4,53	1,61	32,4	1,33	0,1	0,71	0,53	0,07	28,4	0,4	0,01	30

Таблица 2. Химический состав руд месторождения Дарасунское в сравнении с кларком земной коры

Table 2. Chemical composition of ores of the Darasun deposit in comparison with the crustal clark

Элементы/Elements	Cu	Zn	Pb	Cd	W	Co	Re	Mo	Sn
Концентрация в руде, г/т/Concentration in ore, ppm	17785	42817	27647	186	289	81,6	0,012	115	7,2
Кларк земной коры, г/т/Earth's crust, ppm	47	83	16	0,13	1,3	18	0,0007	1,1	2,5
Элементы/Elements	Ag	Au	As	Sb	Bi	Se	Te	In	Tl
Концентрация в руде, г/т/Concentration in ore, ppm	272	142	45600	315	63,1	3,17	41,9	12,4	2,93
Кларк земной коры, г/т/Earth's crust, ppm	0,07	0,0043	1,7	0,5	0,009	0,05	0,001	0,25	1

Таблица 3. Особенности состава минералов изученной руды Дарасунского месторождения золота

Table 3. Peculiarities of mineral composition of the studied ore of the Darasun gold deposit

Название/Title	Формула/Formula	Химический состав и примеси, мас. % Chemical composition and impurities, wt %
Золото самородное/Nugget gold	Au	Au (69,09...95,52), Ag (3,09...27,61), Hg (1,64...5,55), Cu (0,54...5,61)
Электрум/Electrum	Au,Ag	Au (до 48,95), Ag(36,93...51,35)
Висмут самородный Nugget bismuth	Bi	Pb (до 0,9), Te (до 0,02)
Кальцит/Calcite	CaCO ₃	Mn (0,82...1,81), Fe 0,73 –1,21)
Доломит/Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	Fe (0,812,1), Mn (0,06...1,1)
Сидерит/Siderite	FeCO ₃	Mn (1,33...1,74), Ca (0,24...0,51)
Анкерит/Ankerite	CaFe ²⁺ (CO ₃) ₂	Mn (1,39...1,94)
Пирит/Pyrite	FeS ₂	Co (0,54...1,13), Ni (0,44), As (0,42 –2,3), Sb (0,77)
Марказит/Marcasite	FeS ₂	As (0,01...0,03)
Арсенопирит/Arsenopyrite	FeAsS	Co (0,03), Ni (0,02...0,03)
Галенит/Galena	PbS	Ag (0,76...9,15), Fe (0,66...1,31), Bi (0,17...3,6)
Сфалерит/Sphalerite	ZnS	Fe (7,0...15,45), Mn (0,06...0,09), Cd (0,53...0,87), Tl (до 0,003)
Пирротин/Pyrrhotite	Fe ₇ S ₈	Ni (0,011...0,013), Co (0,012)
Халькопирит/Chalcopyrite	CuFeS ₂	Co (0,46), As (до 0,64), Ni (0,011...0,41)
Висмутин/Bismuthinite	Bi ₂ S ₃	Bi (80,07...80,41), S (19,59...19,93), (Fe до 3,63)
Виллиамит/Willyamite	(Co,Ni) SbS	Co (0,96...3,18), Ni (23,35...25,74), Sb (52,48...53,75), S (14,12...14,61), Bi (1,79...1,55), Fe (1,15...2,49)
Ульманит/Ullmannite	(NiSbS)	Ni (26,54...27,28), Sb (49,32...56,06), S (14,9...15,02), Fe (0,57; Cu (0,83–0,87); As (4,9–7,37)
Козалит/Cosalite	Pb ₂ Bi ₂ S ₅	Pb (34,69...37,58), Bi (39,43...41,19), S (15,03...15,37), Ag (6,28...6,95); Sb (1,68...1,81)
Хейровскит/Heyrovskite	Pb ₆ Bi ₂ S ₉	Pb (52,29...57,69), Bi (24,98...28,55), S (14,05...15,68), Ag (1,53...3,56); Sb (0,8...2,15)
Ютенбогаардит Uytenbogaardite	Ag ₃ AuS	Ag (42,97...53,57), Au (33,78...44,62), S (11,28...13,61), Cu (0,006...1,12)
Фрейбергит/Freibergite	(Ag,Cu,Fe) ₁₂ (Sb,As) ₄ S ₁₃	Ag (3,08...3,87), Cu (33,48...35,07), Fe (4,82...9,07), Sb (21,04...23,27), As (2,15...3,65)S(25,19...26,51)
Фаматинит/Famatinite	Cu ₃ SbS ₄	Cu (37,6...37,91), Sb (28,45...28,47), S (24,37...24,86), Zn (5,42...6,93)
Буланжерит/Boulangerite	Pb ₅ [Sb ₄ S ₁₁]	Cu (0,77...0,95), Ag (1,23...2,37), Pb (50,07...53,03), Fe (0,48–1,19), Sb (15,46...18,67), Bi (10,66...12,59), S (15,86...1,96), As (до 0,58)
Тетрадимит/Tetradymite	Bi ₂ Te ₂ S	Bi (55,37...55,74), Te (32,57...32,83), S (5,55...5,57), Ag (до 3,22), Cu (0,66...2,98), Sb (до 1,53)
Гессит/Hessite	Ag ₂ Te	Ag (56,7...61,88), Te (37,52...43,3)
Цумоит/Tsumoite	BiTe	Bi (65,21...67,56), Te (32,44...34,79), Ag (до 1,86), Sb (1,31...1,81)
Алексит/Aleksite	PbBi ₂ Te ₂ S ₂	Pb (19,6), Bi (41,75), Te (14,7), S (4,32), Ag (9,83), Au (6,69), Fe (1,58), Cu (1,53)
Пильзенит/Pilsenite	Bi ₄ Te ₃	Bi (52,4...65,42), Te (32,6...37,96), Cu (до 0,95), Fe (1,02...1,18), Ag (до 0,77)
Кварц/Quartz	SiO ₂	Al (до 0,78), Fe (0,26...0,99)
Микроклин/Microcline	KAlSi ₃ O ₈	Содержит до 0,44 Ba
Эпидот/Epidote	Ca ₂ Al (Fe ³⁺ , Al) ₂ [Si ₂ O ₇][SiO ₄]O[OH]	Основные катионные компоненты Mn (до 0,26), Fe (до 10,86), Ca (до 15,31)
Турмалин/Tourmaline	XY ₃ Z ₆ (BO ₃) ₃ [Si ₆ O ₁₈](O,OH,F) ₄	Основной носитель бора
Рутил/Rutile	TiO ₂	V (до 0,79)
Мусковит/Muscovite	KAl ₂ [Si,Al] ₄ O ₁₀ (OH,F) ₂	Примеси Ba (0,55...1,03), Fe (1,62...3,2), F (до 0,2)
Апатит/Apatite	Ca ₅ [PO ₄] ₃ (Cl,OH,F)	Основной носитель фосфора, хлора (до 0,43) и части фтора (2,81...3,68)
Монацит/Monazite	(Ce,La,Nd,Th)PO ₄	Ce (29,51...30,35), La (15,15...16,02), Pr (1,46...2,11), Nd (10,66...11,49), Sm (до 1,02), P (13,56...13,97), Th (до 18,51)
Ксенотим/Xenotime	YPO ₄	Gd (3,54...3,59), Tb (до 1,37), Dy (6,36...8,13), Ho (до 2,02), Er (3,43...3,72), Yb (2,78...4,06), P(16,74...16,82)
Рабдофан/Rhabdophane	(Ce,La,Nd,Th)PO ₄ ·H ₂ O	Ce (28,98), La (11,86), Pr (1,96), Nd (14,68), P (14,32)
Циркон/Zircon	Zr(Hf,Th)SiO ₄	Zr (48,94...51,68), Hf (до 2,25), Th (до 1,13), Si (14,89...15,35)
Бадделеит/Baddeleyite	Zr(Hf)O ₂	Zr (73,9...74,55), Hf (до 1,19...1,45), O (24,26...24,66)
Торит/Thorite	ThSiO ₄	Th (45,41...62,17), Si (6,99...11,18)
Чёрчит (вайншенкит) Churchite (weinschenkite)	YPO ₄ ·2H ₂ O	Y (37,54), Gd (2,24), Dy (4,92), Er (5,02), Yb (4,05)
Алланит-(Ce) (ортит) Allanite-(Ce) (orthite)	(Ce,Ca,La) ₂ (Al,Fe ³⁺) ₃ (SiO ₄) ₃ (OH)	Ce[(5,12...8,02), Ca(9,11...17,32), La (2,23...2,53), Pr (до 1,05), Nd (2,37...4,63)] Al (11,43...12,14), Fe ³⁺ (9,06...9,57), Si (15,65...16,62)
Паризит-Ce/Parisite-Ce	Ca (Ce, La) ₂ (CO ₃) ₃ F ₂	Ca (6,01), Ce(31,28), La(14,48), Pr(2,05), Nd(9,63), Th(2,03), F(5,66)
Синхизит-Ce/Synchisite-Ce	Ca (Ce, La) (CO ₃) ₂ F	Ca (10,94), Ce(25,75), La(13,33), Pr(1,87), Nd(9,76), F(4,36)

Примеси редкоземельных элементов связаны с монацитом, рабдофаном, ксенотитом, а также синхизитом и паризитом. С ними же связана и часть фтора, который входит в состав мусковита и фторрапатита. Носителями циркония и гафния являются циркон и бадделейт (табл. 3)

Содержание легких лантаноидов в рудах месторождения в два раза превосходит содержание элементов иттриевой группы, 61 и 28 г/т соответственно, что видно на графике нормирования концентраций в рудах к содержаниям в хондрите (рис. 1). При этом из всей группы редкоземельных элементов незначительно превышает кларк земной коры только Lu.

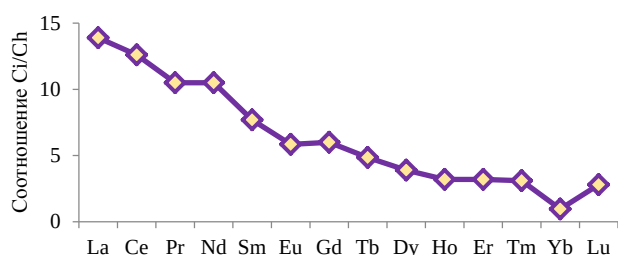


Рис. 1. Соотношение лантаноидов в рудах Дарасунского месторождения к хондриту, где C_i – содержание элемента в руде, C_h – содержание в хондрите

Fig. 1. Ratio of lanthanides in ores of the Darasun deposit to chondrite, where C_i is the content of the element in ore, C_h is the content in chondrite

В целом при взаимодействии руд с разными видами реагентов наиболее реактивным показал себя раствор серной кислоты. Этим реактивом извлекаются наиболее высокие концентрации элементов: Ca, Mg, Fe, Mn, Ba, Sr, Cd, Co, Sn. Кроме того,

только сернокислотный раствор выщелачивает из руд Y, Be, Ga и лантаноиды. Раствором гидрокарбоната аммония извлекается большее количество As, Sb, Bi, Ag, Rb, Cs, In, U и Th, чем сернокислотным, и только этим реактивом извлекаются Mo, Zr, P, Sc, Cr, Cs (рис. 2, 3).

Следующие элементы – Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Te и Tl выщелачиваются как растворами серной кислоты, так и растворами гидрокарбоната аммония, при этом в фильтрах перекиси водорода отсутствуют.

Калий и натрий извлекаются только растворами перекиси водорода и серной кислоты примерно в равных концентрациях (коэффициент корреляции 0,99).

В общей сложности из руд извлекаются макрокомпоненты (≥ 1 мг/л): Ca, Mg, P, Fe и As; в концентрациях (≤ 1 мг/л): Cu, Pb, Zn, Cd, Ag, Sb, Mn, Mo Co, Sr, Sc, Cr, Cs и Rb.

Халькофильные элементы в большинстве лучше извлекаются раствором серной кислоты, но в незначительных количествах (табл. 4). Исключение составляют элементы V группы I подгруппы и серебро, для которых более интенсивным реагентом оказался аммония гидрокарбонат (рис. 2, а). Мышьак и сурьма переходят в подвижное состояние на 33 и 16,6 %, соответственно. Висмут обнаружен только в фильтрах NH_4HCO_3 в незначительных количествах (0,2 % от исходного содержания в навеске). Селен и теллур примерно в равной степени эффективно извлекаются растворами серной кислоты и гидрокарбоната аммония (коэффициент корреляции 0,99).

Из сидерофильных элементов в подвижное состояние при воздействии разными реагентами переходят Fe, Co и Ni (рис. 4), при этом активнее всего выщелачиваются сернокислотным раствором. Молибден активно извлекается только раствором гидрокарбоната аммония.

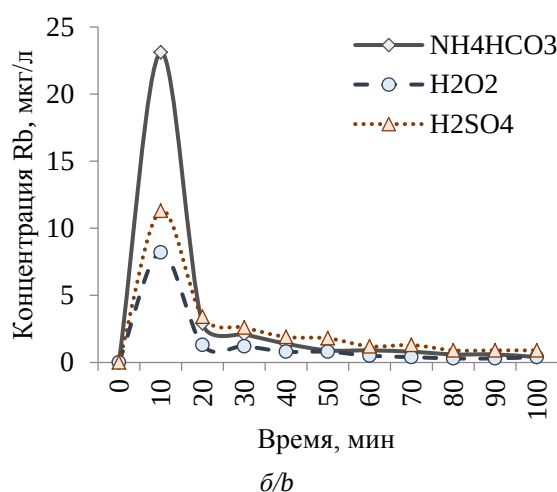
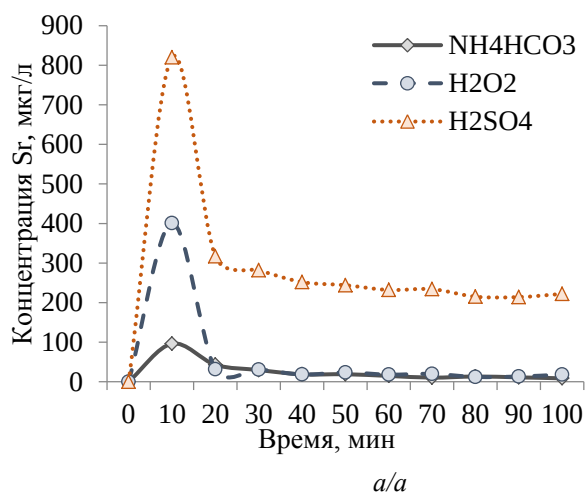


Рис. 2. Динамика извлечения литофильных элементов на примере стронция (а) и рубидия (б) из руд месторождения золота Дарасунское в течение времени различными реагентами

Fig. 2. Dynamics of extraction of lithophile elements on the example of strontium (a) and rubidium (b) from ores of Darasun gold deposit during time by different reagents

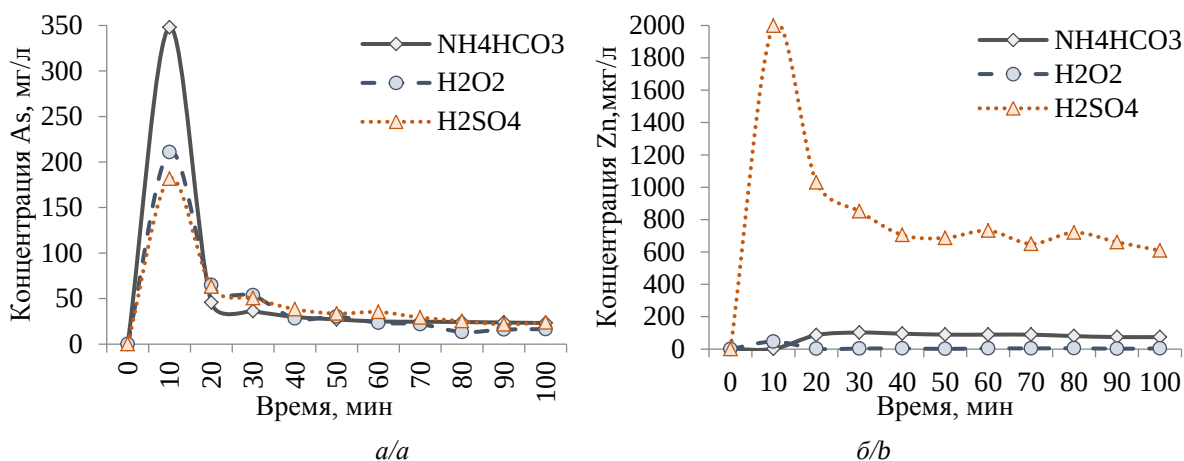


Рис. 3. Динамика извлечения халькофильных элементов на примере мышьяка (а) и цинка (б) из руд месторождения золота Дарасунское в течение времени различными реагентами

Fig. 3. Dynamics of extraction of chalcophilic elements on the example of arsenic (a) and zinc (b) from ores of Darasun gold deposit during time by different reagents

Таблица 4. Доли извлечения халькофильных элементов из руд Дарасунского месторождения золота различными реагентами

Table 4. Fractions of extraction of chalcophilic elements from ores of Darasun gold deposit by different reagents

Реагент/Reagent	Элементы/Elements											
	Zn	Pb	Cd	Sn	Cu	Ag	Tl	As	Sb	Bi	Se	Te
NH ₄ HCO ₃	0,12	0,61	0,13	0,3	0,1	0,17	4,9	33,3	16,6	0,2	11	0,32
H ₂ O ₂	0,01	0,01	–	0,5	0,001	0,07	0	15,3	9,2	–	9,5	0,13
H ₂ SO ₄	1,36	0,63	2,36	2,3	0,1	0,06	18,2	27,5	9	–	15	0,33

«–» концентрации элемента в фильтрате ниже предела обнаружения/element concentration in the filtrate is below the detection limit.

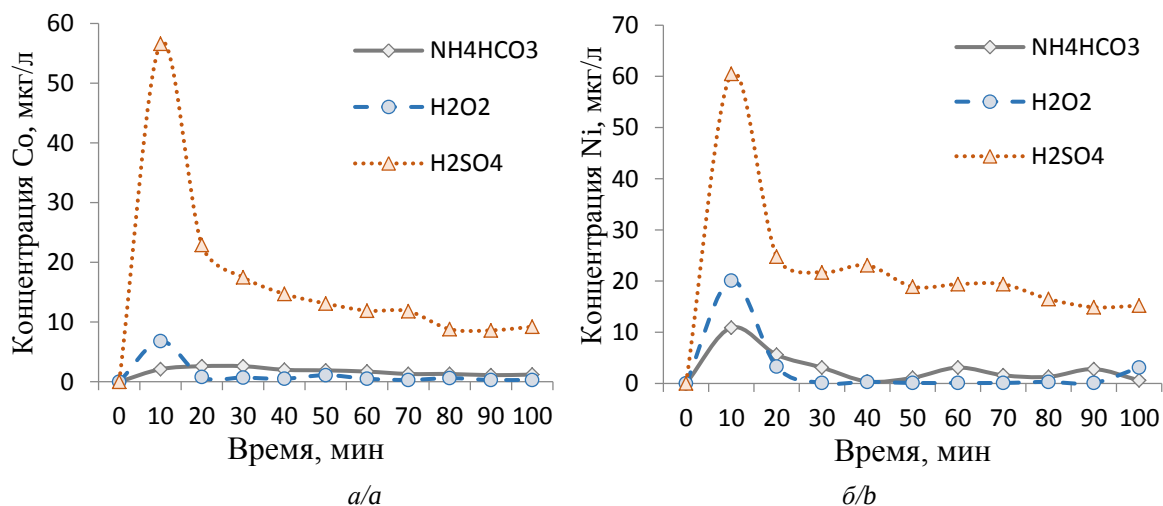


Рис. 4. Динамика извлечения сидерофильных элементов на примере кобальта (а) и никеля (б) из руд месторождения золота Дарасунское в течение времени различными реагентами

Fig. 4. Dynamics of recovery of siderophilic elements on the example of cobalt (a) and nickel (b) from ores of Darasun gold deposit during time by different reagents

В целом комплекс элементов, переходящих в подвижное состояние, коррелирует с их содержанием в исходных минеральных ассоциациях (табл. 3) в виде основных компонентов либо в виде примесей. Так, эффективно извлекаемый в прочих

экспериментальных исследованиях [34, 35] вольфрам, в экспериментальных растворах с Дарасунскими рудами имеет концентрации ниже пределов обнаружения, при этом его содержание в руде значительно выше кларка земной коры (табл. 2), что,

скорее всего, определяется тем, что в исходных рудах он находится в составе достаточно инертного минерала – шеелита. Извлечение Вi только раствором гидрокарбоната аммония может быть связано его сродством к карбонатам либо также определяется более легким разложением висмута и тетрадимита в восстановительных условиях, в отличие от окислительных.

Выводы

При взаимодействии руд с разными видами реагентов наиболее реактивным показал себя раствор серной кислоты, им извлекаются наиболее высокие концентрации ряда элементов. Так, основные компоненты сульфидов (Cu, Pb, Zn, Ni, Sn, Cd, Sr, Co)

как минимум в 2 раза интенсивнее извлекаются раствором серной кислоты. Только этим реагентом извлекаются Y, Be, Ga и лантаноиды.

Раствором гидрокарбоната аммония извлекается большее количество As, Sb, Bi, Ag, Rb, Cs, In, U и Th, чем сернокислотным, и только этим реактивом извлекаются Mo, Zr, P, Sc, Cr. В подвижное состояние переходят Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Te и Tl при взаимодействии руды с растворами серной кислоты и гидрокарбоната, при этом в фильтрате перекиси водорода отсутствуют.

Калий и натрий извлекаются только растворами перекиси водорода и серной кислоты примерно в равных концентрациях (коэффициент корреляции 0,99).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юргенсон Г.А., Юргенсон Т.Н. Дарасунское рудное поле // Месторождения Забайкалья. Т. 1. Кн. 2. – М.: Геоинформмарк, 1995. – С. 4–15.
2. 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. – P. 108288 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108288>
3. 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. – P. 107266 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107266>
4. 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, M. Casas-Ruiz, A. Hierro, M. Baskaran, M.E. Ketterer // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 138. – P. 384–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.004>
5. 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, S.M. Pérez-Moreno, J.P. Bolívar // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – Vol. 447. – P. 130782 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130782>
6. Nordstrom D.K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals // Acid sulfate weathering. – 1982. – Vol. 3. – P. 37–39.
7. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) / В.В. Оленченко, Д.О. Кучер, С.Б. Бортникова, О.Л. Гаскова, А.В. Еделев, М.П. Гора // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 4. – С. 782–795.
8. Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Саева О.П. Геохимическое моделирование поведения тяжелых металлов в техногенных системах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 89–101.
9. Шадрунова И.В., Самойлова А.С., Орехова Н.Н. Закономерности формирования медьсодержащих стоков на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 3. – С. 304–311.
10. Захарова В.Я., Сквалецкий Е.Н. Геоэкологические прогнозы условий разработки южно-уральских медноколчеданных месторождений // Проблемы региональной экологии. – 2011. – № 5. – С. 34–37.
11. Microbial ecology of Río Tinto, a natural extreme acidic environment of biohydrometallurgical interest / E. González-Toril, A. Aguilera, N. Rodriguez, D. Fernández-Remolar, F., Gómez E. Diaz, A. García-Moyano, J.L. Sanz, R. Amils // Hydrometallurgy. – 2010. – Vol. 104. – Iss. 3–4. – P. 329–333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.011>
12. 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, B. Li, Z. Yang, X. Liu, J. Ni, X. Li, X. Zhang, N. Zhou, H. Yin., C. Jiang, L. Hao // Science of The Total Environment. – 2023. – Vol. 873. – P. 162330 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162330>
13. Immobilization of metal(loid)s from acid mine drainage by biological soil crusts through biomineralization / X. Kuang, L. Peng, Sh. Chen, Ch. Peng, H. Song // Journal of Hazardous Materials. – 2023. – Vol. 443. – Pt. B. – P. 130314 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130314>
14. Transport and fate of Cu and Cd in contaminated paddy soil under acid mine drainage / Y. Pan, H. Ye, Y. Yang, C. Yang, X. Li, T. Ma, Z. Dang, G. Lu // Journal of Environmental Management. – 2023. – Vol. 334. – P. 117517 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117517>
15. 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, B. Bao, C. Luo, Y. Zhang // Chemical Geology. – 2023. – Vol. 634. – P. 121571 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121571>
16. 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. – P. 164269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164269>

17. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Хусаинова А.Ш. Бактерии и водоросли – участники первичного почвообразования на отходах переработки полиметаллических руд // Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов экстремальных местообитаний: Материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 80-летию д.б.н., проф. Б.Б. Намсараева, 100-летию Республики Бурятия, 300-летию Российской академии наук. – Новосибирск, 2023. – С. 10–11.
18. Артамонова В.С., Калиев А.Ж. Факторы техногенного преобразования природных компонентов на Гайском месторождении // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 12 (131). – С. 372–373.
19. Определение элементного гомеостаза детского населения Забайкальского края методом многоэлементного инструментального нейтронно-активационного анализа / Л.А. Михайлова, Н.В. Барановская, Е.А. Бондаревич, Ю.А. Витковский, Е.С. Эпова, О.В. Еремин, Б.В. Нимаева, Е.В. Агеева // Гигиена и санитария. – 2023. – Т. 102. – № 2. – С. 123–131.
20. Mketo N., Nomngongo Ph.N., Ngila J.C. An innovative microwave-assisted digestion method with diluted hydrogen peroxide for rapid extraction of trace elements in coal samples followed by inductively coupled plasma-mass spectrometry // Microchemical Journal. – 2016. – Vol. 124. – P. 201–208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.010>
21. Ferrer F.M., Dold B., Jerez O. Dissolution kinetics and solubilities of copper sulfides in cyanide and hydrogen peroxide leaching: Applications to increase selective extractions // Journal of Geochemical Exploration. – 2021. – Vol. 230. – P. 106848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106848>
22. Tungsten extraction from scheelite hydrochloric acid decomposition residue by hydrogen peroxide / L. Xiao, L. Ji, Ch. Yin, A. Chen, X. Chen, X. Liu, J. Li, L. He, F. Sun, Zh. Zhao // Minerals Engineering. – 2022. – Vol. 179. – P. 107461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107461>
23. Technospheric mining of critical and strategic metals from nickel slag – Leaching with citric acid and hydrogen peroxide / B. Lim, M. Aylmore, D. Grimsey, R.D. Alorro // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 219. – P. 106066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106066>
24. Aydoğan S., Motasim M., Ali B. The novelty of silver extraction by leaching in acetic acid with hydrogen peroxide as an organic alternative lixiviant for cyanide // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 2. – P. e24784. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24784>
25. Microwave-assisted extraction of rare earth elements from phosphogypsum-Effect of hydrogen peroxide addition / L.N. Widjaja, J. Lie, F.E. Soetaredjo, J.-Ch. Liu // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2024. – Vol. 200. – P. 109800 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109800>
26. Михайлов А.Н., Овсейчук В.А. Влияние различных реагентов на эффективность подземного скважинного выщелачивания урана из руд Хиагдинского месторождения // Вестник ЗабГУ. – 2022. – Т. 28. – № 4. – С. 16–27.
27. What chemical reaction dominates the CO₂ and O₂ in-situ uranium leaching? Insights from a three-dimensional multicomponent reactive transport model at the field scale / W. Qiu, Y. Yang, J. Song, W. Que, Z. Liu, H. Weng, J. Wu, J. Wu // Applied Geochemistry. – 2023. – Vol. 148. – P. 105522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105522>
28. Baran V., Škvor F., Voseček V. Formation of the ammonium-uranyl-carbonate complexes of the type (NH₄)₄[UO₂(CO₃)₃], prepared by precipitative re-extraction // Inorganica Chimica Acta. – 1984. – Vol. 81. – P. 83–89. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)88739-3](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)88739-3)
29. Alguacil F.J., Navarro P. Non-dispersive solvent extraction of Cu(II) by LIX 973N from ammoniacal/ammonium carbonate aqueous solutions // Hydrometallurgy. – 2002. – Vol. 65. – Iss. 1. – P. 77–82. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00093-2)
30. Selective leaching of vanadium in calcification-roasted vanadium slag by ammonium carbonate / H.-Y. Li, K. Wang, W.-H. Hua, Zh. Yang, W. Zhou, B. Xie // Hydrometallurgy. – 2016. – Vol. 160. – P. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.014>
31. Scheelite conversion in sulfuric acid together with tungsten extraction by ammonium carbonate solution / X. Li, L. Shen, Q. Zhou, Z. Peng, G. Liu, T. Qi // Hydrometallurgy. – 2017. – Vol. 171. – P. 106–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.05.005>
32. Highly efficient diluent-free solvent extraction of uranium using mixtures of protonated trioctylamine and quaternary ammonium salts. Comparative Life Cycle Assessment with the conventional extractant / E. Guerinoni, S. Dourdain, Z. Lu, F. Giusti, G. Arrachart, J. Couturier, D. Hartmann, S. Pellet-Rostaing // Hydrometallurgy. – 2024. – Vol. 224. – P. 106257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106257>
33. Роль атмосферных выпадений в процессах криогенеза в зонах окисления сульфидных месторождений / А.Б. Птицын, Т.И. Маркович, В.А. Павлюкова, Е.С. Эпова // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2005. – № 1. – С. 33–35.
34. Эпова Е.С., Юргенсон Г.А., Еремин О.В. Экспериментальное моделирование процессов выщелачивания руд месторождения Любовь (Забайкалье) // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 486. – № 4. – С. 469–474.
35. 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 20.05.2024).

Информация об авторах

Екатерина Сергеевна Эпова, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 672002 г. Чита, а/я 1032; <https://orcid.org/0000-0002-5670-6809>; apikur1@ya.ru

Георгий Александрович Юргенсон, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибир-

ского отделения Российской академии наук, Россия, 672002 г. Чита, а/я 1032; <https://orcid.org/0000-0002-7818-7528>; yurga@mail.ru

Олег Вячеславович Еремин, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 672002 г. Чита, а/я 1032; <https://orcid.org/0000-0002-0849-4557>; yeroleg@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.05.2024

Поступила после рецензирования: 06.06.2024

Принята к публикации: 02.04.2025

REFERENCES

1. Yurgenson G.A., Yurgenson T.N. Darasun ore field. *Deposits of Transbaikalia*. Vol. 1. B. 2. Moscow, Geoinformmark Publ., 1995. pp. 4–15. (In Russ.)
2. 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 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108288>
3. 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, 107266 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107266>
4. Barbero L., Gázquez M.J., Bolívar J.P., Casas-Ruiz M., Hierro A., Baskaran M., Ketterer M.E. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.004>
5. 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, 130782 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130782>
6. Nordstrom D.K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *Acid sulfate weathering*, 1982, vol. 3, pp. 37–39.
7. Olenchenko V.V., Kucher D.O., Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Edelev A.V., Gora M.P. Vertical and lateral distribution of highly mineralized solutions of acidic drainage according to the data of electrotomography and hydrogeochemistry (Ursk dump, Salair). *Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 4, pp. 782–795. (In Russ.)
8. Korneeva T.V., Yurkevich N.V., Saeva O.P. Geochemical modeling of heavy metals behavior in technogenic systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 89–101. (In Russ.)
9. Shadrunkova I.V., Samoilova A.S., Orekhova N.N. Regularities of formation of copper-containing effluents at mining enterprises. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2008, no. 3, pp. 304–311. (In Russ.)
10. Zakharova V.Ya., Skvaletsky E.N. Geocological forecasts of conditions for the development of South Ural copper-coal deposits. *Problems of regional ecology*, 2011, no. 5, pp. 34–37. (In Russ.)
11. González-Toril E., Aguilera A., Rodríguez N., Fernández-Remolar D., Gómez F., Díaz E., García-Moyano A., Sanz J.L., Amils R. Microbial ecology of Río Tinto, a natural extreme acidic environment of biohydrometallurgical interest. *Hydrometallurgy*, 2010, vol. 104, Iss. 3–4, pp. 329–333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.011>
12. Huang Q., Liu Z., Guo Y., Li B., Yang Z., Liu X., Ni J., Li X., Zhang X., Zhou N., Yin H., Jiang C., Hao L. Coal-source acid mine drainage reduced the soil multidrug-dominated antibiotic resistome but increased the heavy metal(loid) resistome and energy production-related metabolism. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 873, 162330 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162330>
13. Kuang X., Peng L., Chen Sh., Peng Ch., Song H. Immobilization of metal(loid)s from acid mine drainage by biological soil crusts through biomineralization. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, vol. 443, Pt. B, 130314 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130314>
14. Pan Y., Ye H., Yang Y., Yang C., Li X., Ma T., Dang Z., Lu G. Transport and fate of Cu and Cd in contaminated paddy soil under acid mine drainage. *Journal of Environmental Management*, 2023, vol. 334, 117517 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117517>
15. Zhou Z., Wen H., Zhu C., Bao B., Luo C., Zhang Y. 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, 121571 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121571>
16. Hajhashemi 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164269>
17. Artamonova V.S., Bortnikova S.B., Khusainova A.Sh. Bacteria and algae - participants of primary soil formation on the waste of polymetallic ore processing. *Ecology and geochemical activity of microorganisms of extreme habitats. Proc. of the III All-Russian Conference with international participation, dedicated to the 80th anniversary of Dr. B.B. Namsaraev, Prof. B.B. Namsaraev, 100th anniversary of the Republic of Buryatia, 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences*. Novosibirsk, 2023. pp. 10–11. (In Russ.)
18. Artamonova S.V., Kaliev A.J. Factors of technogenic transformation of natural components at the Gaiskoye deposit. *Bulletin of the Orenburg State University*, 2011, no. 12 (131), pp. 372–373. (In Russ.)
19. Mikhailova L.A., Baranovskaya N.V., Bondarevich E.A., Vitkovsky Y.A., Epova E.S., Eryomin O.V., Nimaeva B.V., Ageeva E.V. Determination of elemental homeostasis of the child population of the Zabaikalsky Krai by the method of multi-element instrumental neutron activation analysis. *Hygiene and sanitation*, 2023, vol. 102, no. 2, pp. 123–131. (In Russ.)

20. Mketo N., Nomngongo Ph.N., Ngila J.C. An innovative microwave-assisted digestion method with diluted hydrogen peroxide for rapid extraction of trace elements in coal samples followed by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 2016, vol. 124, pp. 201–208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.08.010>
21. Ferrer F.M., Dold B., Jerez O. Dissolution kinetics and solubilities of copper sulfides in cyanide and hydrogen peroxide leaching: APPLICATIONS to increase selective extractions. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, vol. 230, 106848 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106848>
22. Xiao L., Ji L., Yin Ch., Chen A., Chen X., Liu X., Li J., He L., Sun F., Zhao Zh. Tungsten extraction from scheelite hydrochloric acid decomposition residue by hydrogen peroxide. *Minerals Engineering*, 2022, vol. 179, 107461 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107461>
23. Lim B., Aylmore M., Grimsey D., Alorro R.D. Technospheric mining of critical and strategic metals from nickel slag – Leaching with citric acid and hydrogen peroxide. *Hydrometallurgy*, 2023, vol. 219, 106066 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106066>
24. Aydoğan S., Motasim M., Ali B. The novelty of silver extraction by leaching in acetic acid with hydrogen peroxide as an organic alternative lixiviant for cyanide. *Heliyon*, 2024, vol. 10, Is. 2, e24784 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24784>
25. Widjaja L.N., Lie J., Soetaredjo F.E., Liu J.-Ch. Microwave-assisted extraction of rare earth elements from phosphogypsum- Effect of hydrogen peroxide addition. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2024, vol. 200, 109800 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109800>
26. Mikhailov A.N., Ovseichuk V.A. Influence of different reagents on the efficiency of in-situ borehole leaching of uranium from ores of Khiagda deposit. *Bulletin of ZabGU*, 2022, vol. 28, no. 4, pp. 16–27. (In Russ.)
27. Qiu W., Yang Y., Song J., Que W., Liu Z., Weng H., Wu J., Wu J. What chemical reaction dominates the CO₂ and O₂ in-situ uranium leaching? Insights from a three-dimensional multicomponent reactive transport model at the field scale. *Applied Geochemistry*, 2023, vol. 148, 105522 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105522>
28. Baran V., Škvor F., Voseček V. Formation of the ammonium-uranyl-carbonate complexes of the type (NH₄)₄[UO₂(CO₃)₃], prepared by precipitative re-extraction. *Inorganica Chimica Acta*, 1984, vol. 81, pp. 83–89. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-1693\(00\)88739-3](https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)88739-3)
29. Alguacil F.J., Navarro P. Non-dispersive solvent extraction of Cu(II) by LIX 973N from ammoniacal/ammonium carbonate aqueous solutions. *Hydrometallurgy*, 2002, vol. 65, Iss. 1, pp. 77–82. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00093-2)
30. Li H.-Y., Wang K., Hua W.-H., Yang Zh., Zhou W., Xie B. Selective leaching of vanadium in calcification-roasted vanadium slag by ammonium carbonate. *Hydrometallurgy*, 2016, vol. 160, pp. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.014>
31. Li X., Shen L., Zhou Q., Peng Z., Liu G., Qi T. Scheelite conversion in sulfuric acid together with tungsten extraction by ammonium carbonate solution. *Hydrometallurgy*, 2017, vol. 171, pp. 106–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.05.005>
32. Guerinoni E., Dourdain S., Lu Z., Giusti F., Arrachart G., Couturier J., Hartmann D., Pellet-Rostaing S. Highly efficient diluent-free solvent extraction of uranium using mixtures of protonated trioctylamine and quaternary ammonium salts. Comparative Life Cycle Assessment with the conventional extractant. *Hydrometallurgy*, 2024, vol. 224, 106257 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106257>
33. Pitsyn A.B., Markovich T.I., Pavlyukova V.A., Epova E.S. Role of atmospheric deposition in the processes of cryogenesis in oxidation zones of sulfide deposits. *Vestnik of the North-Eastern Scientific Centre of the FEB RAS*, 2005, no. 1, pp. 33–35. (In Russ.)
34. Epova E.S., Yurgenson G.A., Eremin O.V. Experimental simulation of processes of ore leaching from Lyubov deposit (Transbaikalian region). *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, no. 2, pp. 647–650. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X19060023> (In Russ.)
35. Epova E.S. Cryogeochemistry of the oxidation zone of the sulfide deposit Udokan (Eastern Transbaikalia). *Modern Problems of Science and Education*, 2013, no. 5, 553 p. (In Russ.) Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10745> (accessed 20 May 2024).

Information about the authors

Ekaterina S. Epova, Cand. Sc., Junior Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, P.O. Box 1032, Chita, 672002, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5670-6809>; apikur1@ya.ru

Georgiy A. Yurgenson, Dr. Sc., Chief Scientific Researcher; Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, P.O. Box 1032, Chita, 672002, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7818-7528>; yurgga@mail.ru

Oleg V. Eremin, Cand. Sc., Research Associate, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, P.O. Box 1032, Chita, 672002, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-0849-4557>; yeroleg@yandex.ru

Received: 24.05.2024

Revised: 06.06.2024

Accepted: 02.04.2025