

УДК 550.4.02

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛЮБОВЬ (ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Е. С. Эпова\*, Г. А. Юргенсон, О. В. Ерёмин

Представлено академиком РАН М.И. Эповым 23.03.2017 г.

Поступило 12.04.2017 г.

Для определения подвижных химических элементов в процессах кислотного выветривания в ландшафтах золоторудного месторождения Любовь (Забайкальский край) проведены эксперименты по сернокислотному выщелачиванию золото-кварцевых руд месторождения, содержащих до 2%. Определён химический состав рудных образцов и описаны основные и второстепенные минералы. Состав рудных и породообразующих минералов изучен методами рентгеноструктурного и химического анализов и электронной микроскопии. По результатам экспериментов выявлена группа подвижных халькофильных элементов (Pb, Zn, Cu, Cd), элементов V группы (As, Sb, Bi), связанных с сульфидами и сульфосолями, группа редкоземельных и рассеянных элементов. Выявлена различная динамика выщелачивания этих групп химических элементов. Определено, что даже при содержаниях ниже кларковых в кислый раствор интенсивно переходят лантаноиды, цезий, хром, германий.

*Ключевые слова:* геохимия элементов, сернокислотное выщелачивание, золото, месторождение Любовь, Забайкалье.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524864469-474>

В Забайкальском крае расположено большое количество старых золоторудных предприятий, деятельность которых остановлена [1]. Ландшафты таких территорий подвержены воздействию кислых дренажных вод, образующихся при окислении сульфидов — пирита, арсенопирита и др., что приводит к миграции большого количества рудных и породообразующих элементов. Подвижные элементы и интенсивность их выноса можно оценить из экспериментов по сернокислотному выщелачиванию руд и пород [2, 3]. Цель предлагаемой работы заключается в экспериментальном определении элементов, извлекаемых из руд месторождения Любовь (Забайкалье) в результате сернокислотного выщелачивания. Эти данные важны для оценки влияния горнорудной промышленности на окружающую среду и разработок технологий добычи ценных металлов.

Месторождение золота Любовь находится в Кыринском районе Забайкальского края в пределах Любавинского рудного узла. Оно открыто в 1882 г. и с перерывами обрабатывалось до 1994 г. [1]. Лока-

лизовано в толще песчанико-сланцевых отложений триаса в связи с малыми интрузиями гранитов и гранодиоритов кыринского комплекса, а также дайками гранит-порфиоров, кварцевых порфиоров и других пород позднеюрского возраста, приуроченными к зоне Любавинского разлома [4]. В оперяющих системах трещин локализованы золотокварцевые жилы, а также зоны прожилково-вкрапленных руд. Содержание Au в руде варьируется в пределах 0,12–2021 г/т, распределение гнездовое и струйчатое (столбовое). Встречаются ажурные скелетные кристаллы массой до 38 г [5]. Среднее содержание золота в промышленных рудах 36,9 г/т. Месторождение разрабатывалось подземным способом. С начала разработки месторождения с 1894 г. добыто 10 528 кг учтённого Au [1]. Руда обогащалась по гравитационно-флотационной технологической схеме. В результате разработки месторождения сформированы склады отвальных хвостов, в настоящее время интенсивно размывающиеся под действием природных геолого-географических факторов.

Для добычи оставшихся и новых разведанных запасов руды, содержащих более 25 т золота, разработана технология кучного выщелачивания, в соответствии с которой предполагается переработка

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Чита*

\*E-mail: [apikur1@yandex.ru](mailto:apikur1@yandex.ru)

также хвостов обогащения и отвалов, находящихся при эксплуатационных и разведочных выработках.

Для экспериментов были отобраны образцы сульфидных руд с Больше-Фёдоровского участка Любавинского рудного поля в 2013 г. Материал руд можно отнести к золото-тетрадимит-сфалерит-арсенопирит-кварцевому минеральному составу. Отобранный материал дробился и просеивался. В экспериментах использовался класс 1–2 мм. Химический состав руд в мас. %: SiO<sub>2</sub> 74,58; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 11,88; CaO 2,13; MgO 1,18; Na<sub>2</sub>O 2,17; K<sub>2</sub>O 2,80; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4,41; MnO 0,12; TiO<sub>2</sub> 0,45; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0,09; Σ 99,81.

Фазовый состав рудных минералов определён на электронном сканирующем микроскопе Leol430 VP

с энергодисперсионным спектрометром INCA ENERGY 300. Размер зонда < 0,1 мкм. Время измерения 50 с. Аналитики С.В. Канакин, Е.А. Хромова (ГИН СО РАН). Химический анализ элементов в руде и растворах проводился аккредитованной лабораторией ЗАО “SGS Vostok Limited” методом масс-спектрометрии на спектрофотометре Perkin Elmer Optima 5300 DV, результаты приведены в табл. 1.

Основные минералы руд представлены жильным кварцем и сульфидами с примесью сульфосолей. Золотоносные жилы связаны с ассоциацией, включающей золото, арсенопирит, пирит (рис. 1). Содержание рудных минералов в жилах варьируется от 0,1 до 2,1%.

**Таблица 1.** Содержание элементов в рудах месторождения Любовь (Забайкалье) по сравнению с кларком земной коры (по А.П. Виноградову) и концентрации в экспериментальных растворах (в числителе минимальное, в знаменателе максимальные значения) и поверхностных водах месторождения

Элемент	Руда	Кларк	Фильтрат	Поверхностные воды
As	9020	1,7	$\frac{290}{605}$	330
Sb	30,6	0,5	$\frac{1,8}{4,2}$	250
Bi	2,8	0,009	$\frac{0,01}{0,17}$	0,1
Cd	0,6	0,013	$\frac{2,6}{23,8}$	2
Co	8,8	18	$\frac{9,5}{36,3}$	20
Cu	39	47	$\frac{77}{276}$	9
Pb	66	16	$\frac{33,1}{64,8}$	500
Mo	8	1,1	$\frac{1}{1}$	10
Ni	17	58	$\frac{14}{36,5}$	20
Zn	172	83	$\frac{96}{420}$	275
Cr	190	83	$\frac{1}{6,7}$	40
Cs	5,2	3,7	$\frac{0,47}{0,59}$	0,18
Sc	6	10	$\frac{3,6}{6,4}$	3
Sn	10	2,5	$\frac{8,4}{54,5}$	10

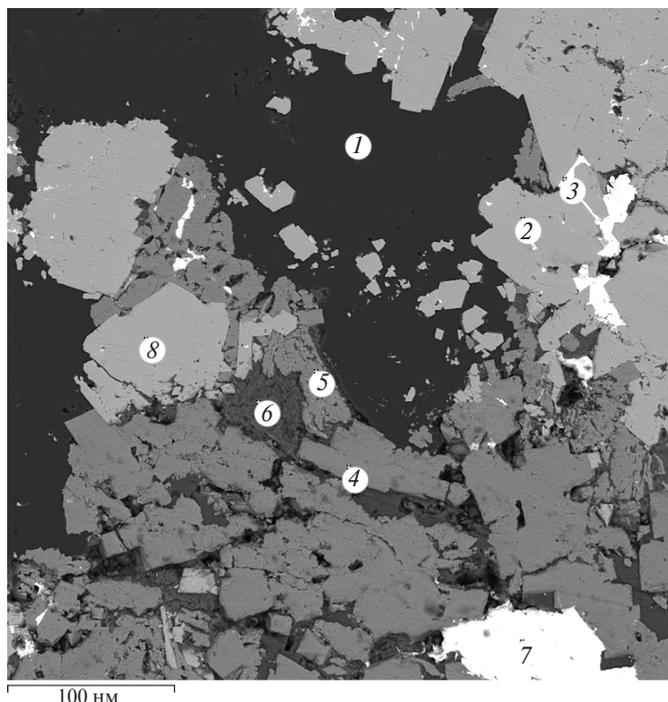
Окончание табл. 1

Элемент	Руда	Кларк	Фильтрат	Поверхностные воды
W	43	1,3	$\frac{174}{561}$	220
Be	<5	3,8	$\frac{1}{3,1}$	<5
Y	18,4	20	$\frac{17,5}{22,2}$	5
Ce	45,6	70	$\frac{9,6}{10,5}$	0,38
La	23,6	29	$\frac{4}{4,5}$	20
Dy	3,24	5	$\frac{2,9}{4}$	0,03
Er	1,95	3,3	$\frac{1,6}{2,12}$	0,03
Eu	0,98	1,3	$\frac{0,8}{1,1}$	<0,01
Gd	3,46	8	$\frac{2,7}{3,54}$	0,04
Ga	18	19	$\frac{0,45}{0,52}$	0,1
Ho	0,71	1,7	$\frac{0,58}{0,77}$	<0,01
Lu	0,38	0,8	$\frac{0,24}{0,43}$	<0,05
Nd	20,8	37	$\frac{5,9}{7,4}$	0,17
Pr	5,15	9	$\frac{1,3}{1,5}$	0,03
Sm	3,8	8	$\frac{1,8}{2,5}$	0,04
Tb	0,56	4,3	$\frac{0,45}{0,63}$	0,01
Tm	0,33	0,27	$\frac{0,23}{0,29}$	<0,01
Yb	2,1	0,33	$\frac{1,5}{1,97}$	0,05

Основной сульфидный минерал арсенопирит имеет состав, близкий к стехиометрическому (11 анализов): содержания (мас.%) Fe находятся в пределах 35,8–38,22, As 39,0–40,82, S 22,13–23,83. Наблюдается некоторое завышение содержаний серы и занижение мышьяка, что связано, вероятно, с особыми условиями формирования кварцевых жил

в углеродистых сланцах. Наряду с обычным арсенопиритом присутствует его никелистая разновидность (рис. 2).

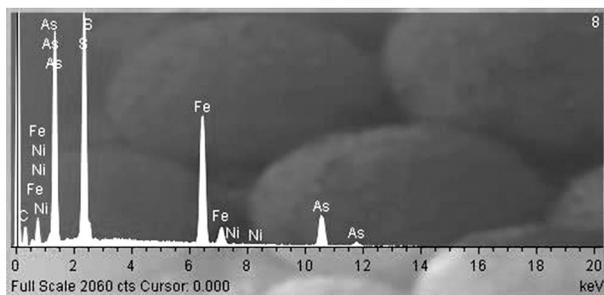
Вторым по распространённости сульфидом является пирит, состав которого варьируется: содержание Fe находится в пределах 46,64–47,61, S — 52,39–53,36 мас.%, что соответствует стандартному.



**Рис. 1.** Типичное строение и минеральный состав руды: 1 — кварц; 2, 8 — арсенопирит; 3 — золото; 4, 5 — пирит; 6 — хлорит; 7 — галенит. Электронно-микроскопический снимок.

Содержание галенита едва достигает 0,1%. Состав его (мас.%): Pb 82,84–86,17; S 12,6–16,12. Содержание серы несколько превышает стандартные так же, как у арсенопирита. Золото имеет состав (%) Au 85,72, Ag 14,28.

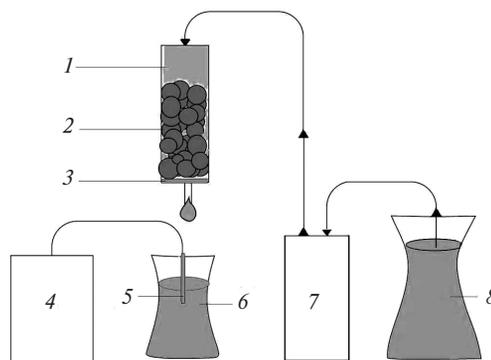
Среди второстепенных минералов установлены галенит, тетрадимит, джемсонит, магнетит, сфалерит. Редкие минералы представлены антимонитом, кинноварью, шеелитом, рутилом, висмутином. Второстепенные жильные минералы представлены слоистыми силикатами — биотитом, ферримусковитом, хлоритом, серицитом, а также кальцитом, анкеритом, турмалином, баритом. В рудах присутствует цериевый монацит, в составе которого (7 анализов) определены (мас.%): Ce 29,86–32,41; La 15,37–17,36;



**Рис. 2.** Рентгеновский спектр никелистого арсенопирита.

Pr 1,73–2,87; Nd 10,66–12,27; Sm до 2,25; Th 1,97–2,30; P 14,69–16,43; O 17,80–23,26; Ca 0,41–0,45.

Фильтрационные эксперименты проводили сернокислым раствором (pH 2), приготовленным из дистиллированной воды и кислоты марки “ч.д.а.” (рис. 3). Масса образцов руды составляла 25 г, скорость фильтрации контролировалась с помощью перистальтического насоса Peristaltic pump type pp1-05 и составляла 3 мл/мин. Фильтрат отбирали в пробирки по 45 мл и анализировали. Общий объем исходного раствора составил 450 мл. Кислотность фильтрата определяли pH-метром Анион-7000 с ис-



**Рис. 3.** Схема эксперимента: 1 — фильтрационная колонка; 2 — навеска руды; 3 — фильтр; 4 — pH-метр; 5 — комбинированный электрод; 6 — фильтр; 7 — перистальтический насос; 8 — исходный раствор.

пользованием комбинированного электрода марки ЭСР10601/4. Для получения статистически достоверных данных опыты ставились в трёх параллелях, по их средним значениям строились графики (рис. 4).

По данным фазового и химического составов образцов руд и элементов в выщелачивающихся растворах можно выделить две группы химических элементов: халькофилы (Pb, Zn, Cu, Cd) и элементы V группы Периодической системы (As, Sb, Bi). Для этих элементов, а также для W, Sn, Ni характерны значительные превышения кларковых содержаний табл. 1. Экспериментальные данные по выщелачиванию свидетельствуют об их высокой подвижности (рис. 4).

Содержание редкоземельных элементов в рудах близко к кларковым или незначительно выше, как у иттербия и тулия (табл. 2). Незначительные превышения кларков отмечены для Cs, Cr, Ge, Li, концентрирующихся в слюдистом материале микросланцев. Эти элементы также мигрируют в сульфатных растворах.

Динамика концентраций большинства элементов в выщелачивающихся фильтратах характеризуется резким возрастанием на начальных стадиях с последующим снижением и установлением постоянных значений. Для редкоземельных элементов концентрации в фильтрационных растворах увеличиваются со временем от минимальных до стационарных значений.

Изменение кислотности фильтрационных растворов в целом сопряжено с интенсивностью выщелачивания элементов (см. рис. 4).

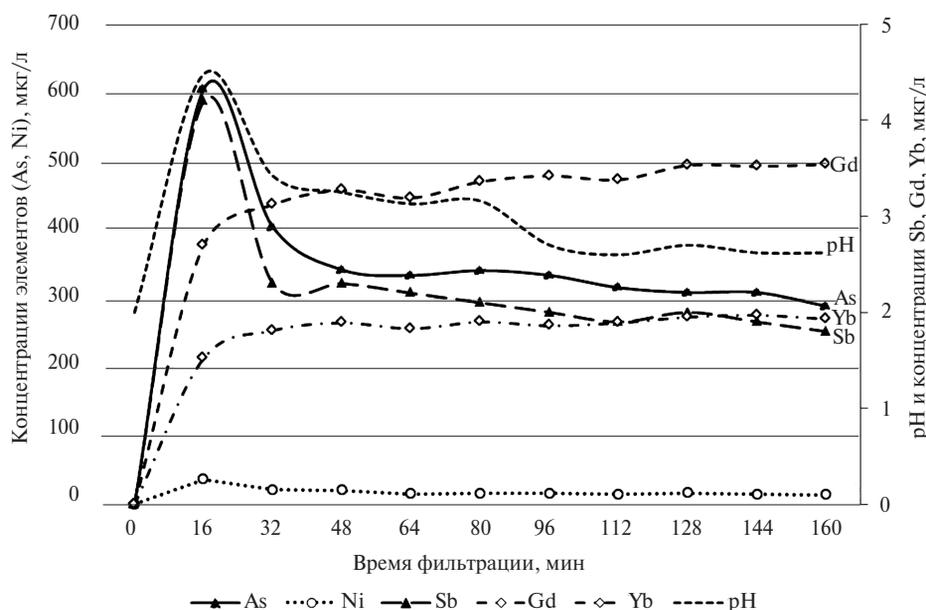
Исходя из полученных закономерностей извлечения элементов при фильтрации сернокислотными растворами, можно предположить, что достижение постоянных концентраций их выноса лимитируются процессами внутренней диффузии и (или) химических реакций внутри зёрен твёрдых минеральных фаз.

Все выщелачивающиеся элементы установлены в поверхностных водах месторождения и в составах новообразованных гипергенных минералов.

В результате проведённых экспериментов по выщелачиванию золотоносных руд месторождения Любовь сернокислотными растворами установлено, что активной миграции подвержены халькофильные (Pb, Zn, Cu, Cd) и элементы V группы Периодической системы (As, Sb и Bi). Они оказывают наиболее значительное влияние на компоненты экологических систем геотехногенного ландшафта.

Несмотря на незначительные содержания в рудных минералах редких и РЗЭ, их концентрации в водах рудного района значительно превышают фоновые уровни поверхностных вод.

**Источник финансирования.** Работа поддержана РФФИ и правительством Забайкальского края (проект № 14–05–98012 p\_сибирь\_a).



**Рис. 4.** Значения концентраций элементов и кислотности (pH) в экспериментах по сернокислотному выщелачиванию руд месторождения Любовь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологические исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья: история, современное состояние, проблемы, перспективы развития / ред. Г.А. Юргенсон. Новосибирск: Наука, Сиб. издат. фирма РАН, 1999. 567 с.
2. *Птицын А.Б., Маркович Т.И., Павлюкова В.А., Эпова Е.С.* // Геохимия. 2007. № 7. С. 795–800.
3. *Еремин О.В., Эпова Е.С., Юргенсон Г.А., Смирнова О.К.* // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Т. 22. № 2. С. 125–131.
4. *Биндеман Н.Н.* // Разведка и охрана недр. 1968. № 10. С. 6–8.
5. *Юргенсон Г.А.* Минеральное сырьё Забайкалья: учеб. пособие. Ч. I. Кн. 3. Благородные металлы. Чита: Поиск, 2008. 256 с.

## THE EXPERIMENTAL SIMULATION OF ORES LEACHING PROCESSES FROM THE DEPOSIT LYUBOV (TRANSBAYKALIA)

**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*

Presented by Academician of the RAS M.I. Epov March 23, 2017

Received June 01, 2017

The experiments on the sulfuric acid leaching of main ore-bearing rocks of gold deposit Lyubov (Zabaikalsky Krai) were carried out for the determination of mobile chemical elements in acidic landscapes weathering processes. The chemical composition of ore samples, major and minor minerals have been determined. The composition of the ore and rock-forming minerals were studied by X-ray diffraction and chemical analyses and electron microscopy. According to the results of the experiments has been revealed a group of mobile chalcophile elements (Pb, Zn, Cu, Cd), V group elements (As, Sb, Bi) associated with sulfide minerals and a group of rare and trace elements. It has been determined that with contents below clarkes abundance the lanthanides, cesium, chromium, germanium are rapidly moved in acidic solution.

*Keywords:* geochemistry of elements, sulfuric acid leaching, gold, Lyubov deposit, Transbaikalia.