

А. Ш. Шавекина^{1,2}, С. Б. Бортникова¹, С. С. Волынкин¹, К. Н. Лобанова²*

Минералого-геохимические особенности Бериккульского хвостохранилища, пос. Новый Бериккуль (Кузнецкий Алатау)

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: khusainovaas@ipgg.sbras.ru, khusainova@igm.nsc.ru

Аннотация. На Бериккульском хвостохранилище (пос. Новый Бериккуль, Тисульский район, Кемеровская обл., Кузнецкий Алатау) проведен комплекс минералого-геохимических работ с использованием прецизионных методов. По степени измененности вещества на хвостохранилище выделяются мало- (слабоизмененные) и сильноокисленные переработанные руды. Для малоокисленных переработанных руд наблюдается начальная стадия окисления, которая выражена в виде мономинеральных пленок гидроксидов Fe по пириту и пирротину. Тогда как сильноокисленного вещества вторичная минерализация проявлена больше, отмечены гидроксиды Fe, ангидрит, ярозит, плюмбоярозит, скородит. В сильноокисленном веществе отмечено увеличение содержания Fe в 2 раз, Pb в 8 раз, As в 9 раз, Cu в 3 раза, тогда как содержание Zn уменьшилось в 2 раза по сравнению с малоокисленным веществом.

Ключевые слова: минералого-геохимические особенности, хвостохранилище, гипергенные процессы

A. Sh. Shavekina^{1,2}, S. B. Bortnikova¹, S. S. Volynkin¹, K. N. Lobanova²*

Mineralogical and geochemical characteristics of Berikul tailings (Kuznetsk Alatau)

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: khusainovaas@ipgg.sbras.ru, khusainova@igm.nsc.ru

Abstract. The Berikul tailings dump (Novy Berikul village, Tisulsky district, Kemerovo region, Kuznetsk Alatau) a complex of mineralogical and geochemical work was carried out using precise methods. Based on the change degree of the substance in the tailing dump, low and highly oxidized processed ores are distinguished. For low oxidized processed ores, an initial stage of oxidation is observed, occurring in the form of monomineral films of iron hydroxides on pyrite and pyrrhotite. Although the substance is highly oxidized, secondary mineralization is more pronounced; Iron hydroxides, anhydrite, jarosite, plumbojarosite, and scorodite are noted. In the highly oxidized substance, an increase in Fe content was noted by 2 times, Pb by 8 times, As by 9 times, Cu by 3 times, and the Zn content decreased by 2 times compared to the low oxidized substance.

Keywords: mineralogical and geochemical features, tailings, supergene processes

Введение

Эффективное использование и повторная разработка хранилищ переработанных руд месторождений благородных и цветных металлов возможна при корректной оценке их объемов, ресурсов ценных и токсичных компонентов, определении форм нахождения элементов и условий их концентрирования вследствие протекающих геохимических процессов [1-4]. Выявление закономерностей перераспределения химических элементов между твердой и жидкой фазами в ходе гипергенной трансформации техногенного вещества является актуальной фундаментальной задачей. *Цель работы* заключается в изучении химического и минералогического состава переработанных руд хвостохранилища и оценке степени их преобразованности.

Объект исследования

Объектом исследования является Бериккульское хвостохранилище, представленное отходами цианирования руд Бериккульского золотоизвлекательного завода (пос. Новый Бериккуль, Тисульский район, Кемеровская область), где перерабатывались главным образом руды Старо- и Ново-Бериккульского месторождений. Старо-Бериккульское месторождение обрабатывалось с 1942 по 1962 гг. Благородные металлы (Au, Ag) извлекались с помощью флотации и цианирования, а переработанные руды складировали в виде отходов цианирования флотоконцентрата (кеков). Ново-Бериккульское месторождение обрабатывалось в начале 1970 гг., переработанные руды представлены отходами цианирования руд.

Группа Бериккульских месторождений, расположенные в Мариинской тайге, входит в состав Бериккульского рудного поля, находящегося на западном контакте Дудетского гранитоидного плутона. Рудные тела располагаются среди андезитобазальтовых, андезитовых порфиритов амгинского яруса среднего кембрия (бериккульская свита), реже в штоках и дайках диоритовых, диабазовых порфиритов, габбро-диоритов и габбро пироксен-оливинового состава – фациальных субвулканических комагматах вулканических пород бериккульской свиты [5-6].

В Бериккульском рудном поле известно более 250 рудных тел, которые могут быть классифицированы на три типа [5]. Рудные тела 1-го типа представляют собой золото-сульфидно-кварцевые жилы, сложенные кварцем, кальцитом, хлоритом, арсенопиритом, пиритом, халькопиритом, тетраэдритом, молибденитом, шеелитом, золотом пробы 520–880 ‰, электрумом. Содержание сульфидов не превышает 5–10%. Из рудных тел 1-го типа добыто 70% благородного металла. Рудные тела 2-го типа сложены тонкими жилами и прожилками (штокверк) золото-сульфидно-кварцевого состава, линзовидными и неправильной формы обломками беретизированных порфиритов, сцементированных сульфидно-кварцевым материалом. Из рудных тел 2-го типа добыто 20% благородного металла. В рудных телах 2-го типа по сравнению с рудными телами 1-го типа увеличивается содержание сульфидов до 10–30%. Рудные тела 3-го типа приурочены к юго-западному контакту алюмосиликатных и карбонатных пород. Рудные тела представлены залежами неправильных гнездо-, трубо- и линзообразных форм. Такие

залежи сложены пиритом, сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, суммарное количество может достигать 70–75%. Из рудных тел 3-го типа добыто 5% благородного металла.

Отходы цианирования флотоконцентрата (кеки) после обезвреживания складировались в виде насыпного отвала вдоль р. Мокрый Берикуль, длиной 245 метров и высотой от 3 до 6 метров, где было накоплено около 70 тыс. тонн отходов [7]. В 2000-х годах, кеки цианирования были перевезены на Комсомольское хвостохранилище (пос. Комсомольск, Кемеровская обл.). В 1970-х годах, в двух километрах ниже по течению, на левом берегу р. Мокрый Берикуль, было отсыпано новое хвостохранилище прудового типа размером 500 на 100 м, куда складировались отходы цианирования руд.

Методика исследования

Минеральный и химический состав изучен с помощью вертикальных разрезов шурфов, на которых описана минералого-геохимическая зональность и опробованы все визуально различающиеся слои. Глубина шурфов варьирует от 50 см до 2,2 метров. По степени измененности вещества в шурфе №1 отмечено чередование и переслаивание слабоизмененного (малоокисленного) исходного вещества переработанных руд. Шурф №2 представлен окисленным веществом.

Из каждого слоя бралась проба ~2 кг в герметично закрывающиеся пластиковые пакеты (грипперы). В лабораторных условиях пробы были гомогенизированы и методом квартования разделены на части. Из первой была измерена влажность весовым методом, и затем сухие пробы были истерты для анализов. Из второй части были приготовлены пасты («вода/порода» равное 1/2) для определения кислотно-основного баланса вещества [8], и в них измерены значения pH (pH/T-метром HI 9025 C, HANNA Instruments, США) (аналитики Глухова Т.А., Тулисова К.Ю.). Содержания металлов и металлоидов определялось методом АЭС-ИСП на спектрометре iCap 6000 Duo (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) в стандартной конфигурации (аналитик Нечепуренко С.Ф.).

Для изучения минерального состава и их взаимоотношений по разрезу были отобраны штучные образцы (3×4 см). В лабораторных условиях пробы высушивались и заливались эпоксидной смолой, делались приполировки по аналогии с аншлифами. Исследование осуществлено с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3LMU (Tescan, Чехия) с энергетическим спектрометром OXFORD (Oxford Instruments, Великобритания) в режимах вторичных и обратно-рассеянных электронов при различных увеличениях (при ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ).

Результаты

Мощность разреза шурфа 1 составляет более 2-х метров (рис. 1а). Разрез представлен субгоризонтальными слоями песчанистого вещества от светло-бежевого до темно-коричневого цвета, с прослойками голубых глин. Общей характеристикой всей толщи является слабощелочная среда с pH пасты 7,21–8,04. Минеральный состав тяжелой фракции представлен на рис. 1 (б-ж). Среди сульфид-

дов отмечены пирит, арсенопирит, халькопирит, сфалерит, пирротин, галенит, единичные зерна скуттерудита и золота. Сульфиды встречаются в виде отдельных зерен, так и минеральных сростаний. Зерна сульфидов имеют признаки дробления, трещиноватости, реже они массивные, однородные. На пирите и пирротине отмечены мономинеральные вторичные пленки гидроксидов железа с примесью As (до 4 мас. %). Нерудные минералы представлены кварцем, плагиоклазом, сидеритом, доломитом, кальцитом, хлоритом, мусковитом, калиевым полевым шпатом.

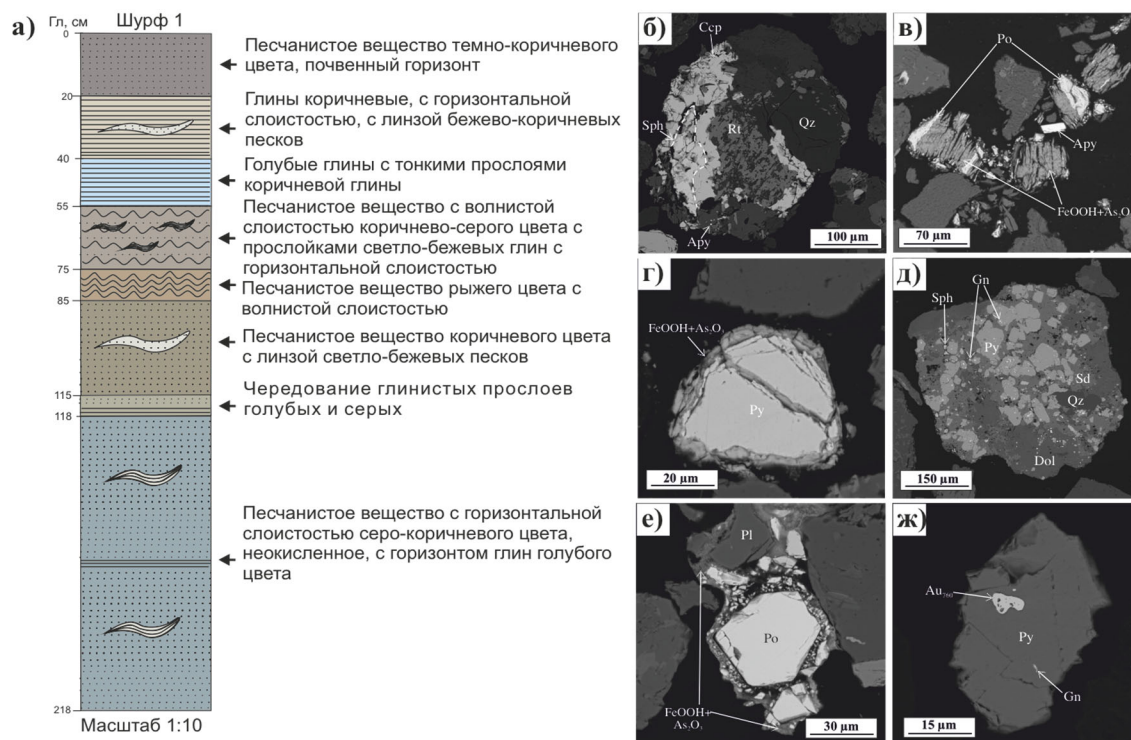


Рис. 1. Разрез и минеральный состав малоокисленного вещества Бериккульского хвостохранилища: а) строение разреза шурфа 1; б-ж) минеральный состав тяжелой фракции, где Py – пирит; Ccp – халькопирит; Apy – арсенопирит; Sph – сфалерит; Gn – галенит; Po – пирротин; FeOOH – гидроксиды железа; Au – самородное золото; Pl – плагиоклаз; Qz – кварц; Sd – сидерит; Dol – доломит; Rt – рутил.

Мощность окисленного разреза (шурф 2) составляет не более 60 см. (рис. 2а). Разрез представлен субгоризонтальными слоями песчанистого вещества от светло-бежевого до рыже-коричневого цвета, с прослойкой горизонта черного цвета. Общей характеристикой всей толщи является сильноокислая среда с pH пасты 1,52–2,49. Среди сульфидов в тяжелой фракции отмечены пирит, сфалерит, халькопирит. На сульфиды проявлена трещиноватость. Зерна частично или полностью окислены, покрыты мономинеральными или зональными пленками. Среди вторичных минералов отмечены (рис. 2): ярозиты, морфология и состав которых варьирует от содержания Fe, K, Pb, As; скородит, гидроксиды Fe, ангид-

рит. Среди нерудных минералов отмечены: кварц, хлорит, мусковит, апатит, аморфный кремнезем, плагиоклаз, калиевый полевой шпат.

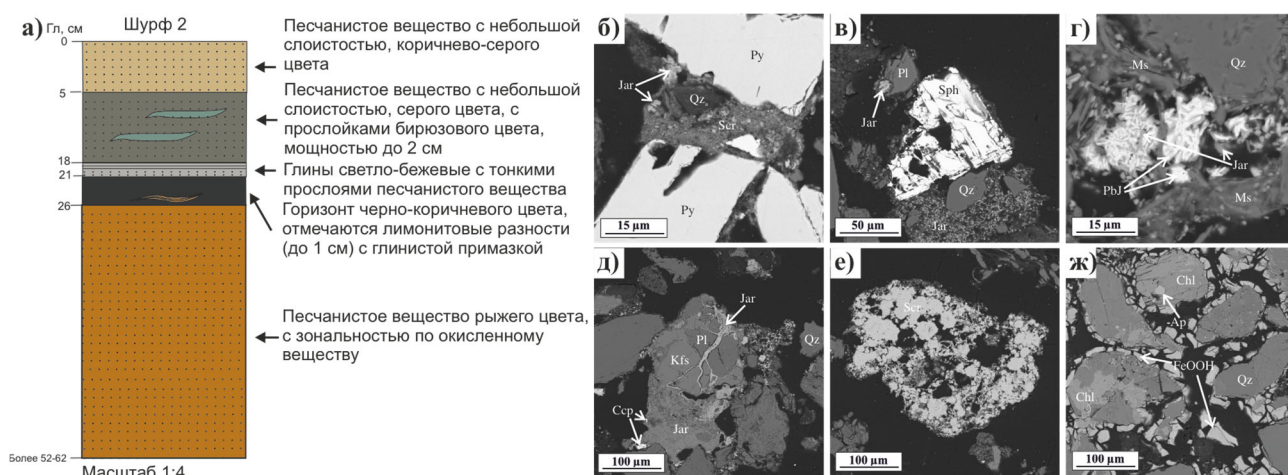


Рис. 2. Разрез и минеральный состав окисленного вещества Бериккульского хвостохранилища: а) строение разреза шурфа 2; б-ж) минеральный состав тяжелой фракции, где Py – пирит; Sph – сфалерит; Ccp – халькопирит; Scr – скородит; Jar – ярозит; PbJ – плюмбоязрозит; FeOOH – гидроксиды железа; Pl – плагиоклаз; Qz – кварц; Qz_a – аморфный кремнезём; Kfs – калиевые полевые шпаты; Ms – мусковит; Chl – хлорит; Ap – апатит.

Распределение средних содержаний Fe, Pb, As, Cu, Zn по данным АЭС-ИСП представлены табл. 1. Для Fe, As, Pb, Cu наблюдается тенденция увеличения содержаний в сильноокисленном веществе, тогда как содержание Zn уменьшилось почти в 2 раза.

Таблица 1

Содержание элементов по данным АЭС-ИСП

Элемент	Fe, %	As, г/т	Pb, г/т	Cu, г/т	Zn, г/т
Мало-окисленное в-во (9)	$\frac{4,9 - 8,4}{6}$	$\frac{130 - 2500}{850}$	$\frac{94 - 550}{280}$	$\frac{36 - 430}{220}$	$\frac{210 - 1100}{585}$
Окисленное в-во (10)	$\frac{6,0 - 14}{11}$	$\frac{1700 - 15000}{7500}$	$\frac{680 - 4600}{2300}$	$\frac{130 - 2000}{700}$	$\frac{170 - 780}{320}$

Примечание. n – количество анализов в выборке; над чертой – разброс частных содержаний в выборках (минимум – максимум), под чертой – среднее арифметическое.

Заключение

Минералого-геохимические исследования вещественного состава переработанных руд Бериккульского хвостохранилища показали неоднородность в строении и распределении вещества. Для малоокисленного вещества наблюдается начальная стадия окисления, проявленная в образовании мономинеральных пленок гидроксидов Fe по пириту и пирротину. Тогда как в сильноокисленном веществе вторичная минерализация больше проявлена, отмечены гидроксиды Fe, ангидрит, ярозит, плюмбоярозит, скородит.

Благодарности

Работа выполнена по Госзаданию ИГМ (проект FWZN-2022-0025) и ИНГГ СО РАН (проект 0266-2022-0028). Аналитические работы выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оленченко В.В., Кучер Д.О., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Еделев А.В., Гора М.П. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) // Геология и геофизика, 2016, Т. 57 (4), с. 782-7951.
2. Maluckov B.S. Biorecovery of nanogold and nanogold compounds from gold-containing ores and industrial wastes // Applied Microbiology and Biotechnology, 2021, V. 105 (9), pp. 3471-3484.
3. Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Volynkin S.S., Edelev A.V., Grakhova S.P., Kalnaya O.I., Khusainova A.S., Gora M.P., Khvashchevskaya A.A., Saeva O.P., Podolynnaya V.A., Kurovskaya V.V. Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage // Chemical Geology, 2021, V. 586, 120623.
4. Liu L., Li J., Su L., Fang D., Zhou L. An integrated process incorporating pH-controlled biomineralization and sulfate bioreduction to facilitate recovery of schwertmannite and sulfated polysaccharides from acid mine drainage // Chemical Engineering Journal, 2024, 150614.
5. Алабин Л.В., Калинин Ю.А. Металлогения золота Кузнецкого Алатау. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999, 237 с.
6. Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верхозин А.В. Структурно-динамическая модель золоторудных месторождений, образованных в несланцевом и черносланцевом субстрате. Ч.1. Бериккульское месторождение (Кузнецкий Алатау) // Известия Томского политехнического университета, 2008, Т. 313, №1, с. 12-26.
7. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2006, 169 с.
8. Sobek A.A. Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils // Cincinnati, Ohio: Industrial Environmental Research Laboratory, Office of Research, Development, US Environmental Protection Agency, 1978. P. 204.

© А. Ш. Шавекина, С. Б. Бортникова, С. С. Вольнкин, К. Н. Лобанова, 2024