

УДК 549

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-3

ИЗМЕНЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД САМОЛАЗОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, АЛДАНСКИЙ ЩИТ, В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ШТАБЕЛЕ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ**Е.В. Белогуб¹, К.А. Новоселов¹, И.Б. Фади́на², М.А. Рассомахин¹**¹ Институт минералогии, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; const31@yandex.ru² ПАО «Селигдар», ул. 26 Пикет 12, г. Алдан, Республика Саха (Якутия), 678900 Россия

Статья поступила в редакцию 02.02.2023 г., принята к печати 13.02.2023 г.

ALTERATION OF SULFIDE ORES OF THE SAMOLAZOVSKOE DEPOSIT, ALDAN SHIELD, IN AN EXPERIMENTAL BIOLEACHING HEAP**E.V. Belogub¹, K.A. Novoselov¹, I.B. Fadina², M.A. Rassomakhin¹**¹ Institute of Mineralogy, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk Region, 456317² Seligdar Company, ul. 26 Piket 12, Aldan, Republic of Sakha (Yakutia), 678900 Russia; const31@yandex.ru

Received 02.02.2023, accepted 13.02.2023

Аннотация. В статье изложены результаты минералогического изучения сульфидных руд Самолазовского месторождения (Алданский щит) и продуктов их бактериального окисления в экспериментальном штабеле биоокисления. Главными рудными минералами первичных руд являются пирит, образующий мелкозернистые кристаллические и тонкозернистые до скрытокристаллических агрегаты, и марказит. Присутствуют сфалерит, галенит, халькопирит, пирротин, блеклые руды, люонит, бурнонит и другие сульфосоли сурьмы, стибнит, арсенопирит, редко – тиманнит, колорадоит, калаверит, гессит, петцит, самородное золото. Изменения руд в экспериментальном штабеле биоокисления максимально проявлены в его верхней части и состоят в развитии корок вторичного тонкозернистого кальцита с повышенными содержаниями Mg и S, смектитов, замещающих полевые шпаты, и пленчатых оксигидроксидов Fe на поверхности и в трещинах руд. В нижней части штабеля техногенные процессы проявлены слабо и в основном выражены в формировании гипса. Сульфиды в той или иной мере сохранились во всем разрезе штабеля, включая скрытокристаллические, колломорфные и ботроидальные агрегаты с нестехиометричным соотношением катионов и анионов и примесями As, Ni и Cu. В ботроидальных выделениях сульфидов Fe встречен галенит, образующий структуры типа «микросептарий», не установленные ранее в первичных рудах. Высокопробное самородное золото выявлено в ассоциации с колорадоитом и калаверитом в виде включений в тонкозернистых агрегатах дисульфидов Fe. Сделан вывод о недостаточном воздействии бактерий на упорные руды в использованном режиме орошения и формировании вторичных минералов, препятствующих извлечению золота.

Ключевые слова: Самолазовское месторождение, Алданский щит, колорадоит, калаверит, золото, упорные руды, биоокисление.

Abstract. The paper presents the results of a mineralogical study of sulfide ores of the Samolazovskoe deposit (Aldan Shield) and the products of their experimental bacterial oxidation in a heap. Pyrite and marcasite are the major minerals of primary ores. They form fine-grained crystalline and micrometer-grained to cryptocrystalline aggregates. Sphalerite, galena, chalcopyrite, pyrrhotite, fahlore, luzonite, bournonite and other Sb sulfosalts, stibnite and arsenopyrite are minor minerals. Tiemannite, coloradoite, calaverite, hessite,

petzite and native gold are rare. The ores in the experimental biooxidation heap are mostly altered in its upper part. The secondary alteration products of ores include fine-grained Mg- and S-bearing calcite, smectites after feldspars, and films of Fe^{3+} -oxyhydroxides on the surface and in fractures of ore. In the lower part of the heap, technogenic processes are weak and are mainly related to the formation of gypsum. The sulfides are preserved throughout the heap vertical profile including very fine crystalline, colloform and botryoidal aggregates with a nonstoichiometric cation/anion ratio and the presence of As, Ni and Cu. The botryoidal aggregates of Fe disulfides contain galena, which forms a «microseptary» structure, which was not found in primary ores. The high-fineness native gold was found in assemblage with coloradoite and calaverite as inclusions in fine-grained aggregates of Fe disulfides. It is concluded on an insufficient impact of the bioleaching of refractory ores in an applied irrigation regime and the formation of secondary minerals that prevent the extraction of gold.

Keywords: Samolazovskoe deposit, Aldan Shield, coloradoite, calaverite, native gold, refractory ores, biooxidation.

Введение

Исследования по биологическому выщелачиванию золота из руд ведутся уже более 100 лет. Тем не менее, собственно биовыщелачивание золота (когда золото принимает участие в метаболизме бактерий) промышленностью пока не используется. Бактерии используются исключительно для вскрытия золота в упорных рудах (Miller, Brown, 2016; Монгуш, 2010). При бактериальном выщелачивании золото-мышьяковых руд, содержащих золото в химически-связанной форме и в виде тончайших включений в арсенопирите и пирите, применяется широкий спектр микроорганизмов, метаболизм которых основан как на окислении серы, так и на окислении железа (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Acidithiobacillus caldus*, *Leptospirillum ferriphilum*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, *Sulfobacillus benefaciens*) (Rawling, 2004). Деятельность бактерий способствует окислению халькогенидов и высвобождению золота, обеспечивая доступ к нему растворителей (Алборов и др., 2018). Единственная в России промышленная установка бактериального выщелачивания в настоящее время реализована для упорных руд Олимпиадинского месторождения¹ (Fomchenko et al., 2010).

Самозавское месторождение расположено в 56 км южнее г. Алдана, Республика Саха (Якутия). Месторождение эксплуатируется с 1999 г. ПАО «Селигдар» открытым способом. Переработка окисленных руд методом кучного выщелачивания позволила получить около 11 т золота². К настоящему времени запасы окисленных руд, пригодных для цианирования, исчерпаны. В первичных сульфидных рудах золото присутствует как в виде тонких и субмикронных выделений самородного золота в сульфидах и жильных минералах, так и в химически связанной сульфидной форме (Леонтьев и др., 2018; Belogub et al., 2019; Filimonova et al., 2020), что является основной причиной их технологической «упорности» (Yannopoulos, 1991). Мелкий размер зерен золота препятствует их гравитационному извлечению, связь части тонкого золота с жильными минералами и тонкозернистый характер агрегатов золотоносных сульфидов не позволяет получать удовлетворительные результаты путем флотации, сульфидная форма не применима для извлечения золота цианидными растворами. В связи с этим, в 2017–2020 гг. на Самозавском месторождении были поставлены эксперименты по бактериальному окислению сульфидных руд (рис. 1).

Штабель высотой 2–3 м был сформирован из материала крупностью <50 мм. Орошение бактериальной культурой начато в августе 2017 г. Бакте-

¹ https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=5be75702d47898b5f1eeaf91820a4b81

² https://nedradv.ru/nedradv/ru/find_place?obj=5be75702d47898b5f1eeaf91820a4b8

Для цитирования: Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Фаина И.Б., Рассомахин М.А. Изменения сульфидных руд Самозавского месторождения, Алданский щит, в экспериментальном штабеле биовыщелачивания. Минералогия, 9(1), 45–59. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-3.

For citation: Belogub E.V., Novoselov K.A., Fadina I.B., Rassomakhin M.A. Alteration of sulfide ore of the Samolazovskoe deposit, Aldan shield, in an experimental bioleaching heap. Mineralogy, 9(1), 45–59. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-1-3.



Рис. 1. Общий вид на штабель кучного выщелачивания и карьер Самолазовского месторождения, 2017 г. (слева), и вертикальный разрез штабеля биовыщелачивания, 2020 г. (справа).

Fig. 1. General view of the leaching heap and an open pit of the Samolazovskoe deposit, 2017 (left), and a vertical section of the bioleaching heap, 2020 (right).

риальный штамм был выделен *in situ* из полуокисленных руд Самолазовского месторождения специалистами ООО «НВП Центр-ЭСТАГео» по заказу ПАО «Селигдар». Мониторинг процесса окисления осуществлялся в течение 2018–2020 гг. После трех лет периодического орошения бактериальными культурами, применение раствора реагента Flotent GL3G, аналогичного по действию с цианидом Na, позволило добиться извлечения ~80 % в ожелезненном поверхностном слое штабеля мощностью около 30 см (рис. 1) и ~50 % в средней-нижней части штабеля. Периодический полив части штабеля кислотой для поддержания среды, благоприятной для жизнедеятельности бактерий, позволил увеличить извлечение в поверхностном слое на 8 %, в среднем-нижнем – на ~20 %. Было установлено, что руды, отобранные с поверхности, по сравнению с отобранными на большей глубине, характеризуются более низкой механической прочностью, большим содержанием глинистых минералов, оксигидроксидов железа, сульфатов и пониженным почти на 30 % содержанием Au. Таким образом, за время эксперимента в результате преимущественного воздействия бактерий на поверхностный слой в штабеле сформировалась вертикальная зональность, проявленная как в различном содержании золота, так и в различных технологических свойствах руд. Кислотное воздействие частично нивелировало эту зональность.

В 2021 г. после прекращения воздействия бактериальными культурами, в лаборатории ПАО Селигдар была проанализирована представительная проба, характеризующая весь объем штабеля без вертикального разделения. Оказалось, что при содержании 2.06 г/т 85 % золота находится в «упорной» форме и только 15 % извлекается цианидными растворами, в связи с чем было принято решение остановить эксперимент.

В данной статье рассматриваются минералогические особенности упорных руд из отработанного штабеля биовыщелачивания. Цель исследования состояла в выявлении минеральных новообразований и установление форм золота в кеке биовыщелачивания в сопоставлении с первичными сульфидными рудами.

Краткая характеристика Самолазовского месторождения

Самолазовское месторождение находится в 56 км южнее г. Алдан и принадлежит Центрально-Алданскому рудному району, который расположен на Алданском щите. Кристаллический фундамент сложен раннепротерозойскими гнейсами и кристаллосланцами верхнеалданской и фёдоровской серий, прорванными интрузиями протерозойских нормальных и умеренно-щелочных калиевых гранитоидов (Леонтьев и др., 2018). Платформенный

чехол образован венд-нижнекембрийскими карбонатными и юрскими терригенными породами. С мезозойской тектоно-магматической активизацией связано образование радиально-кольцевой структуры, наложенной на кристаллический фундамент и маломощный платформенный чехол (Казанский, 2004). В этот период происходило внедрение магматических тел алданского щелочного интрузивно-вулканогенного комплекса (J_1-K_1).

Самозлазовское месторождение принадлежит Юхтинскому рудному узлу, который пространственно приурочен к одноименному массиву изверженных пород, относящемуся к алданскому комплексу (Леонтьев и др., 2018). Юхтинский массив расположен на пересечении северо-западной Юхтинской и субмеридиональной Якутской зон разломов. Массив имеет в плане форму овала, вытянутого в север-северо-восточном направлении более чем на 10 км при ширине 5 км. Он объединяет несколько крупных сближенных интрузивных тел сложной и штокообразной форм, сложенных тремя фазами лебединского монцонит-сиенитового комплекса (J_3-K_1). В геологическом строении месторождения принимают участие нерасчлененные метаморфические и интрузивные образования кристаллического фундамента, кварцевые сиенит-порфиры и монцодиорит-порфиры лебединского комплекса, контактово-метаморфические образования, развитые на контакте интрузивных образований и венд-кембрийских доломитов осадочного чехла. Оруденение связано с гидротермально-метасоматической проработкой щелочных интрузивных пород и экзоконтактовыми изменениями вмещающих стратифицированных толщ.

Самозлазовское месторождение приурочено к провису кровли Юхтинского массива, заполненного скарнированными и мраморизованными доломитами. По текстурно-структурным особенностям и условиям залегания на месторождении выделяются руды скарновые в экзоконтакте массива (отработаны), штокверковые и брекчиево-жильные. Прожилково-вкрапленные, штокверковые руды развиты в пределах мезозойской щелочной интрузии. Брекчиево-жильный тип представлен крутопадающими минерализованными зонами дробления (брекчии, переходящие в жилы) внутри интрузии и пород кристаллического фундамента (Леонтьев и др., 2018).

В минеральном составе прожилково-вкрапленных и прожилковых руд преобладают полевые шпаты, кварц, серицит, доломит, флюорит. Из руд-

ных минералов наиболее распространены пирит и марказит, в небольших количествах присутствуют галенит, сфалерит, халькопирит, пирротин, арсенопирит, блеклые руды широкого спектра составов, люцит, бурнонит, сульванит, сульфосоли Bi, теллуриды Ag, Ag и Au (Леонтьев и др., 2018; Belogub et al., 2019). Дисульфиды Fe в рудах по морфологии можно грубо разделить на тонкозернистые до скрытокристаллических, как правило, пирит-марказитового состава, и мелкозернистые, представленные, преимущественно, пиритом. По данным ЛА-ИСП-МС тонкозернистые массы дисульфидов Fe значительно обогащены примесями As, Sb, Te, Hg, Tl, Au и Ag по сравнению с мелкозернистыми кристаллическими разностями (Belogub et al., 2019).

Методика работ

Первичные руды изучены в штучных образцах, отобранных из керна скважин, пересекающих штокверк, пробуренных в 2015–2016 гг. Проба СМП-4 отобрана из штабеля биоокисления в августе 2021 г. Изученный нами материал отквартован из крупно-объемной промышленно-технологической пробы массой 1000 кг, составленной из 100 частных проб, отобранных по регулярной сети и характеризующих весь объем штабеля.

Из пробы отобрано несколько образцов для изучения новообразований на поверхности руд и изготовления препаратов для оптико-микроскопических исследований, остальная часть издроблена. Из материала крупностью –1 мм получен тяжелый концентрат путем отмывки в лотке с доводкой в бромформе. Фракция +1 мм просмотрена под стереомикроскопом. Из тяжелого концентрата изготовлены полированные брикеты.

Валовый минеральный состав и состав порошковых продуктов изменения определен рентгеноструктурным методом с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-6000, Cu K- α излучение с монохроматором, количественные соотношения рассчитаны методом Ритвельда, программный пакет Siroquant V.4. Оптическая микроскопия отраженного света использовалась при анализе первичных руд и тяжелого концентрата кека биовыщелачивания. Данные оптической микроскопии уточнялись с помощью электронной микроскопии: СЭМ VEGA3 TESCAN SBU, оснащенный энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-act, ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0.3 нА, для количественного

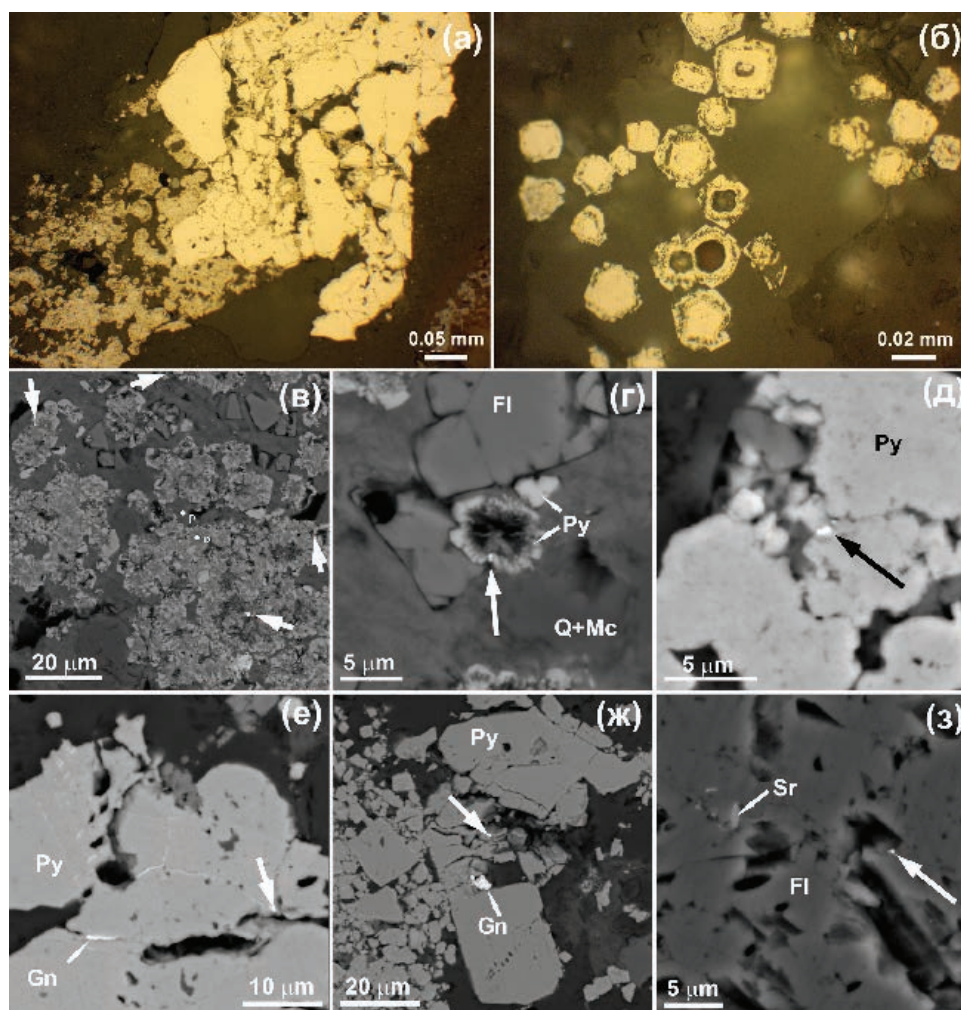


Рис. 2. Первичные штокерково-прожилковые руды: а, б – основные морфологические типы пирита: а – брекчированный мелкозернистый с замещением тонкозернистыми агрегатами, б – тонкозернистые каймы вокруг субгидральных и атоллоидных зерен; в–з – зерна золота (стрелки): в – в скоплении микроконкреций в ассоциации с галенитом, кварцем, флюоритом и роскоелитом (точка р), г – в микроконкреции в ассоциации с эвгидральным пиритом; д – в интерстиции пирита; е, ж – в трещинах пирита в ассоциации с галенитом, з – во флюорите с включением целестина.

а, б – отраженный свет, в–з – BSE-фото.

Fig. 2. Primary stockwork veinlet ores: а, б – main morphological types of pyrite: а – brecciated fine-grained replaced by micrometer-grained aggregates; б – fine-grained rims around subhedral and atoll-like grains; в–з – gold grains (arrows), в – in micronodular aggregate in assemblage with galena, quartz, fluorite and roscoelite (point p); г – in micronodules in assemblage with euhedral pyrite; д – interstitial in pyrite; е, ж – in fractures of pyrite in assemblage with galena; з – in fluorite with celestine inclusions.

а, б – reflected light, в–з – BSE-images.

анализа использованы эталоны MINM-25-53 фирм «ASTIMEX Scientific Limited», (стандарт № 01-044) и «Microanalysis Consultants Ltd.» (стандарт № 1362). В тексте использованы следующие аббревиатуры: Py – пирит, Gn – галенит, Po – пирротин, Fo – блеклая руда, Ang – англезит, Cer – церуссит, Fl – флюорит, Sr – целестин.

Результаты работ

Образцы первичных руд из керна характеризуют штокерк кварц-флюоритовых жил с сульфидной минерализацией в измененных (серицитизированных, карбонатизированных, сульфидизированных, флюоритизированных) сиенитах порфировой структуры. В минеральном составе руд преобладают полевые шпаты (микроклин, ортоклаз, альбит),

кварц, флюорит, слюды (серицит, смектитизированный роскоэлит), карбонаты (доломит, в меньшей степени – кальцит). Главные акцессорные минералы сиенитов – апатит и циркон, псевдоморфозы рутила по титаниту. С продуктивными кварц-флюоритовыми жилами связаны целестин, барит, монацит и точно не диагностированные силикаты РЗЭ.

Основные рудные минералы – пирит и марказит. Пирит образует: 1) эвгедральные и субгедральные выделения с включениями пирротина, галенита, блеклых руд, рассеянные в сиенитах, часто корродированные и брекчированные (рис. 2а); 2) густую вкрапленность субмикронных индивидов, часто обогащенных As, иногда – Sb и Cu, формирующих микроконкреции и гнезда (рис. 2б–г); 3) колломорфные корки, атоллоидные выделения, тонкозернистые и скрытокристаллические агрегаты, часто в тесной ассоциации с марказитом, иногда замещающие зернистый пирит (рис. 2а); 4) зональные идиоморфные кристаллы с зональным распределением As и включений. Марказит может замещать пирит, нарастать на него, часто обогащен As. Второстепенные минералы – галенит, сфалерит и халькопирит. Редкие минералы представлены (в порядке убывания) тетраэдритом, бурнонитом, люцитом, точно не диагностированными сульфосолями Sb, стибнитом, молибденитом, гесситом, теллуридами Ag и Au, колорадоитом, сульфидом Hg, тиманнитом, сульфидами и хлоридами Ag и Hg, самородным серебром.

Золото нами обнаружено только при помощи СЭМ в виде субмикронных включений (0.2–0.8 мкм) в трех позициях: 1) в агрегатах субмикронного дисульфида Fe в ассоциации с тонкозернистым кварцем, флюоритом и роскоэлитом, аналогичную позицию занимает колорадоит и недиагностируемые субмикронные выделения сульфосолей (рис. 2в, г); 2) в виде включений в трещинах в кристаллическом пирите и на его поверхности, часто аналогичную позицию занимают теллуриды, иногда – галенит (рис. 2д–ж); 3) на поверхности вскрытых флюидных включений (?) во флюорите (рис. 2з). По данным ПАО «Селигдар» в рудах очень редко присутствует более крупное золото размером до 400 мкм, которое тесно ассоциирует с арсенопиритом.

Проба, отобранная из штабеля биовыщелачивания, представлена фрагментами сиенитов, преимущественно карбонатизированных и сульфидизированных, иногда содержащих кварц ± карбо-

нат-флюоритовые прожилки. По данным рентгеноструктурного анализа, в пробе преобладают полевые шпаты (микроклин, ортоклаз, альбит), кварц и слюда, в количестве >1 мас. % присутствуют пирит, кальцит, небольшое количество смектитов.

Обломки руд часто покрыты порошковатыми налетами серого, буроватого цвета, иногда – плотными белыми, буроватыми корочками колломорфного строения мощностью первые десятые доли миллиметра. Налеты образуются, преимущественно, на существенно кварц-кальциевых метасоматитах и состоят из гидрослюдисто-смектитовых агрегатов, пропитанных гипсом и рентгеноаморфными гидроксидами Fe. Содержание гипса в налетах может достигать 3–5 мас. %. Не исключено присутствие других сульфатных минералов, содержание которых не достигает пределов обнаружения рентгеноструктурным методом (0.5 мас. %). На флюорит-доломитовых метасоматитах новообразования развиваются значительно меньше и представлены пленками рентгеноаморфных гидроксидов Fe или плотными белыми карбонатными корочками.

Смектиты образуются в результате изменений калиевых полевых шпатов и развиваются по их спайности и на поверхности. Первичный калиевый полевой шпат содержит неравномерную примесь Ba. В продуктах замещения Ba отсутствует, значительно снижаются содержания K, появляются примеси Ca, S и F (табл. 1). Аналитическая сумма дефицитна из-за присутствия воды. Рентгенограмма соответствует неупорядоченному смешанослоистому минералу слюда-смектит. Гипс установлен рентгенографически в составе порошковатых агрегатов со смектитом.

Плотные зональные тонкокристаллические корки на поверхности некоторых обломков пород представлены кальцитом. В его химическом составе присутствуют до 0.43 мас. % MgO, до 0.34 мас. % SrO и до 1.59 мас. % SO₃. При воздействии электронного пучка на кальцит возникают кратеры, свидетельствующие о слабой кристаллической упорядоченности, свойственной вторичным образованиям.

Среди рудных минералов преобладают дисульфиды Fe. Наибольшее распространение имеет зернистый пирит размером до 1 мм, представленный вкрапленностью в частицах пород и свободными частицами в тяжелом концентрате. Иногда он брекчирован и цементируется мелкозернистым кристаллическим марказитом (рис. 3а), содержит включения нерудных минералов (рис. 3б), халько-

Таблица 1

Химический состав калиевого полевого шпата (1, 2) и продуктов его замещения (3) (мас. %)

Table 1

Chemical composition of K-feldspar (1, 2) and product of its replacement (3) (wt. %)

№ п/п	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	CaO	SO ₃	F	Сумма
1	63.47	19.56	0.95	13.86	1.76	–	–	–	99.59
2	64.32	18.40	1.11	14.38	0.53	–	–	–	98.73
3	53.81	17.75	0.65	1.13	–	1.16	0.12	0.69	81.98

Примечание. Здесь и далее, прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Hereinafter, dash – below detection limit.

пирита, редко – борнита, галенита, сфалерита, пирротина с теллуридами (рис. 3в), обрастает каймами тонкозернистого марказита (рис. 3г). Встречаются сложные «скелетные» формы мелкозернистого пирита (рис. 3д), а также мелкозернистые агрегаты пирит-марказитового состава. Вокруг частиц пирита часто наблюдается кайма опала (рис. 3б). Также в составе пробы присутствуют тонкозернистые до скрытокристаллических агрегаты. Их количество оценивается в ~5 % от массы дисульфидов Fe. Они образуют каймы и заполняют трещины в более раннем плотном пирите, формируют колломорфные (рис. 3е, з, и), почковидные (рис. 3и) агрегаты и микроконкреции (рис. 3и), часто ассоциируют с тонкозернистым марказитом (рис. 3е). Для них типично пористое строение и включения золота, теллуридов (калаверита, колорадоита), галенита и вторичных минералов Pb. На поверхности почек может наблюдаться кайма опала (рис. 3ж).

Колломорфные почки дисульфидов Fe имеют зональное строение, отчетливо проявляющееся на фотографиях в отраженном свете и BSE, но не всегда отраженное на микрогеохимических картах и, вероятно, обусловленное различной степенью кристалличности сульфидов (рис. 4). Для этих агрегатов характерно обилие примесей, среди которых преобладают As, Sb, Te, Ni, иногда Cu, иногда в составе агрегатов присутствуют Si и O. Сумма анализа обычно дефицитна (табл. 2). Полученные анализы не соответствуют стехиометрии дисульфидов Fe, что, по-видимому, связано с пористым строением агрегатов.

В концентратах в незначительных количествах встречены халькопирит, пирротин, сфалерит, молибденит, блеклая руда, галенит, золото и теллуриды.

Блеклая руда представлена промежуточными членами ряда теннантит-тетраэдрит (табл. 3),

срастается с халькопиритом и пиритом. Размер отдельных выделений блеклой руды в концентратах достигает 2 мм, но преобладают зерна размером до 0.5 мм. По блеклой руде иногда развиваются сферические агрегаты дендритовидного пирита с радиальными трещинами, заполненными вторичными минералами свинца (рис. 5а, б).

Галенит в тяжелом концентрате представлен включениями в пирите (в том числе в сферолитовых агрегатах), срастаниями с пиритом, а также свободными частицами. Галенит часто замещается церусситом и англезитом, образующими каймы вокруг галенита или полные псевдоморфозы по нему. В сферолитовых агрегатах галенит или продукты его замещения заполняют радиальные трещины, что придает агрегатам вид «септарий» (рис. 5а, б).

Золото совместно с калаверитом и колорадоитом встречено только в виде включений в тонкозернистых и скрытокристаллических дисульфидах Fe. Размер золотинок достигает 10 мкм, золото-теллуридный агрегат может достигать размера 50 мкм (рис. 5). Состав золота отличается высокой чистотой, присутствует только незначительная примесь серебра (табл. 4). Состав колорадоита и калаверита близок стехиометрическим формулам.

Вторичные рудные минералы представлены сульфатами и карбонатами Pb (см. рис. 5а, б) и оксигидроксидами Fe. Гетит присутствует в виде псевдоморфоз по пириту разных морфологических типов и входит в состав порошковатых агрегатов на поверхности руд в приповерхностной зоне штабеля. Содержание гетита в концентратах составляет 2–5 %.

Обсуждение

Деструкция сульфидов с участием бактерий хорошо изучена (Яхонтова, Зверева, 2000). В этом

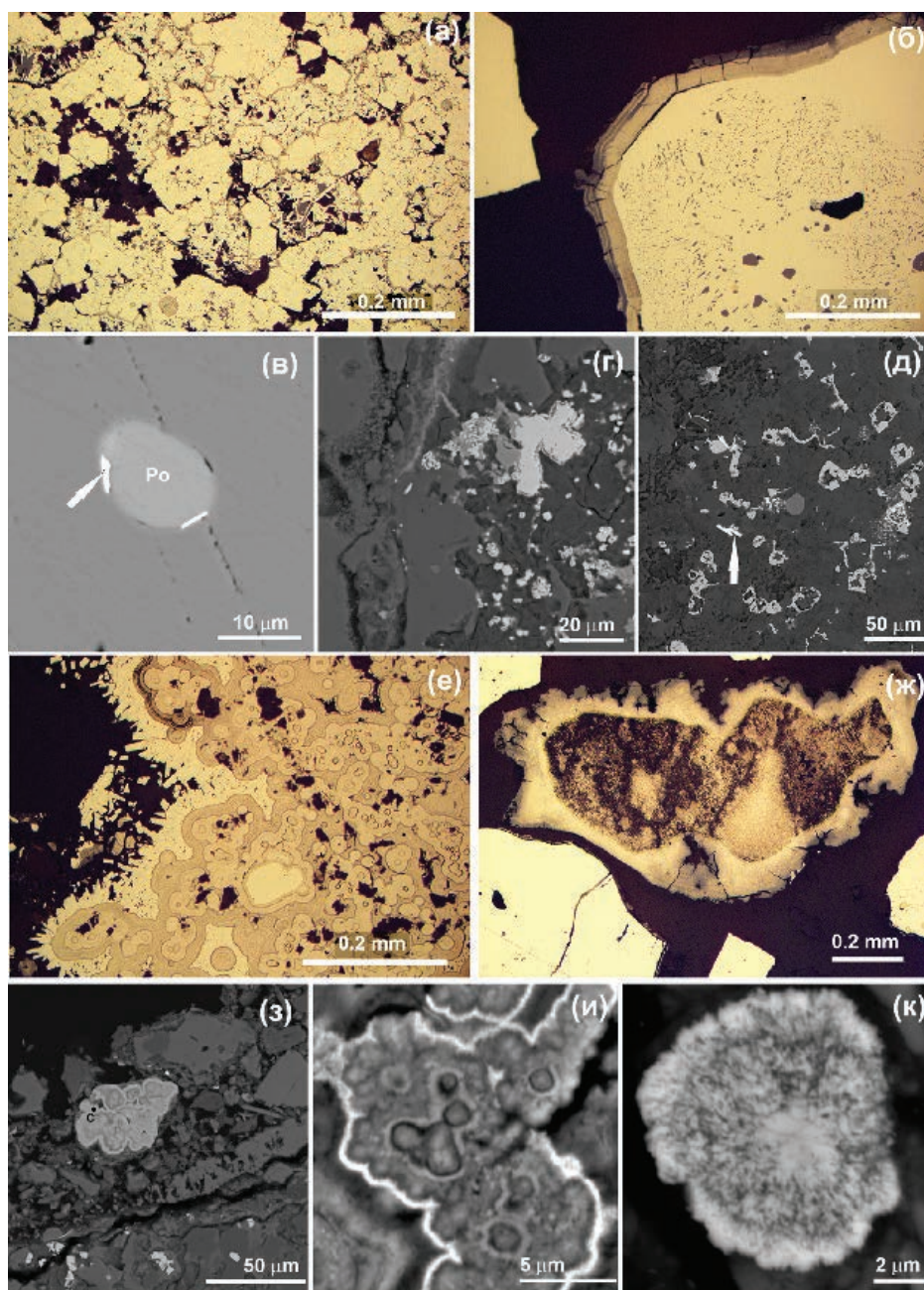


Рис. 3. Морфология дисульфидов Fe в кеке биовыщелачивания, тяжелый концентрат: а – зернистый пирит-марказитовый агрегат; б – кайма скрытокристаллического дисульфида Fe, частично замещенного опалом на субгедральном пирите; в – включение пирротина и теллурида Bi в пирите; г – мелкозернистая вкрапленность пирита в сиените; д – скелетные кристаллы пирита и силикат РЗЭ (стрелка) в сиените; е – колломорфный пирит с каймой кристаллов марказита; ж – кайма скрытокристаллического дисульфида Fe и опала вокруг частично разрушенного пирита; з – колломорфная почка дисульфида Fe (с) в порошковатых продуктах разрушения сиенитов; и – колломорфная почка дисульфида Fe с более плотной каймой; к – микроконкреция.

а, б, е, ж – отраженный свет, в–д, з–к – BSE-фото.

Fig. 3. Morphology of Fe disulfides in a bioleaching cake, heavy concentrate: а – fine-grained pyrite-marcasite aggregate; б – rim of cryptocrystalline Fe disulfide partly replaced by opal on subhedral pyrite; в – pyrrhotite and Bi telluride (arrow) inclusion in pyrite; г – fine-grained pyrite dissemination in syenite; д – skeletal crystals of pyrite and REE silicate (arrow) in syenite; е – colloform pyrite with a microdruze of marcasite crystals; ж – rim of cryptocrystalline Fe disulfide and opal around partly fragmented porous pyrite; з – colloform aggregate of Fe disulfide (с) in powdered products of syenite disintegration; и – colloform aggregate with a denser rim; к – micronodule.

а, б, е, ж – reflected light, в–д, з–к – BSE.

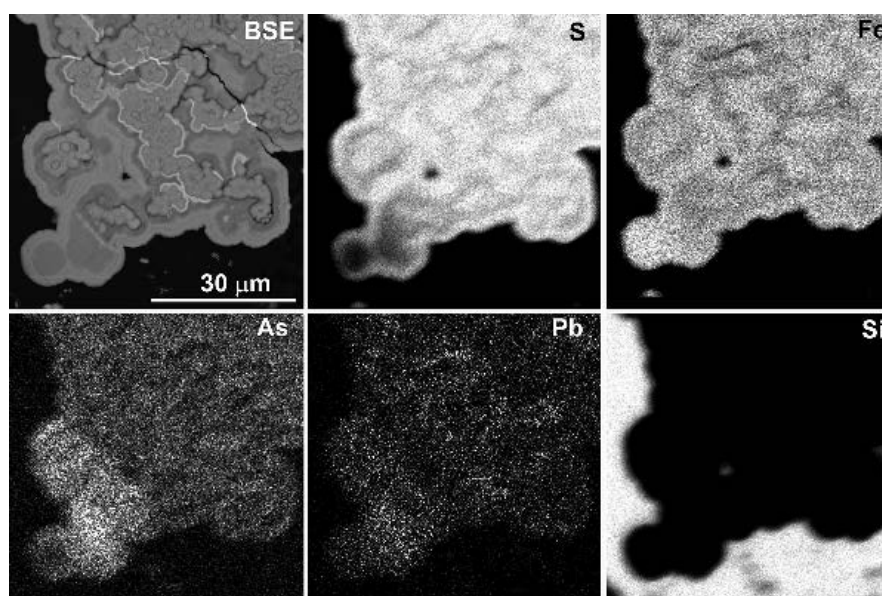


Рис. 4. Распределение Fe, S, As, Pb в коллоидной почке дисульфидов Fe.
Fig. 4. Distribution of Fe, S, As, Pb in a colloform aggregate of Fe disulfides.

Химический состав агрегатов тонкозернистых дисульфидов Fe (мас. %)

Таблица 2

Chemical composition of fine-grained aggregates of Fe disulfides (wt. %)

Table 2

№ п/п	Fe	S	As	Cu	Te	Ni	Sb	O	Si	Сумма	Примечание
1	38.58	46.60	2.90	0.65	1.27	0.54	0.39	7.60	0.15	98.67	Коллоидный
2	39.63	48.48	3.24	—	0.89	0.71	0.33	4.87	0.08	98.23	
3	40.99	45.85	8.52	—	2.85	0.47	0.95	—	—	99.62	
4	43.51	45.01	9.67	1.10	—	—	—	—	—	—	Отдельная почка
5	45.85	52.93	0.40	0.56	—	—	—	—	—	99.79	«Скелетный»

Химический состав блеклой руды (мас. %)

Таблица 3

Chemical composition of fahlore (wt. %)

Table 3

№ п/п	S	Fe	Cu	Zn	As	Sb	Сумма	Формула
1	26.26	1.88	39.17	5.98	7.65	19.06	100.00	$\text{Cu}_{9.78}(\text{Zn}_{1.45}\text{Fe}_{0.53})_{1.98}(\text{Sb}_{2.48}\text{As}_{1.62})_{4.10}\text{S}_{13.00}$
2	27.52	3.77	40.72	3.97	15.95	8.06	100.00	$\text{Cu}_{9.70}(\text{Fe}_{1.02}\text{Zn}_{0.92})_{1.94}(\text{As}_{3.22}\text{Sb}_{1.00})_{4.22}\text{S}_{13.00}$

Примечание. Формулы рассчитаны на S = 13.

Note. Formulae are recalculated to S = 13.

процессе микроорганизм играет роль акцептора электронов, в то время как окисляющийся минерал является донором. Способность живых клеток присоединять электроны связана со спецификой энергетического метаболизма. Доступность сульфидов для воздействия окислителей, в том числе бактерий, зависит от их удельной поверхности, степени дефектности структуры, наличия примесей (Posfai,

Dunin-Barkowski, 2006). Эффективность биоокисления определяется количеством активных живых организмов, которое зависит от кислотно-щелочного и температурного режима, а также присутствия токсичных для бактерий элементов. Сульфидоокисляющие бактерии нуждаются в кислой среде и достаточно термофильны (Yannopoulos, 1991; Башлыкова и др., 2005). Преодоление влияния токсичных

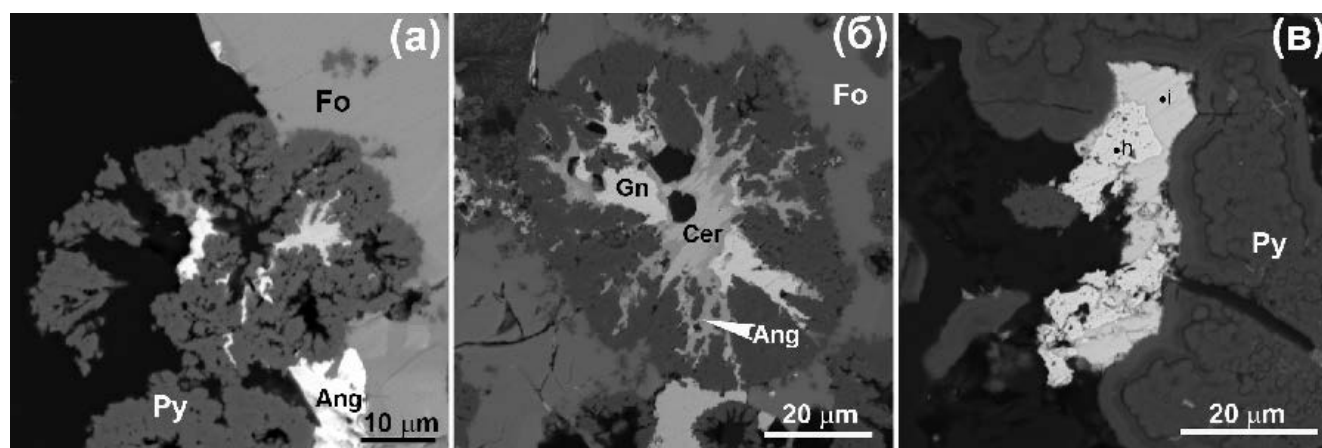


Рис. 5. Редкие минералы в тяжелом концентрате: а – сросток блеклой руды и сферолита дендритовидного пирита с включениями вторичных минералов Pb; б – включение тонкозернистого сульфида Fe с концентрическими включениями минералов Pb; в – сросток золота (h, анализ 1 табл. 4) и колорадоита (i, анализ 4 табл. 4) с колломорфным пиритом. BSE-фото.

Fig. 5. Rare minerals in heavy concentrate: a – intergrowth of fahlore and spherulite of dendritic pyrite with inclusions of secondary Pb minerals; б – inclusion of micrometer-grained Fe disulfide with concentric inclusions of Pb minerals; в – intergrowth of gold (h, analysis 1, Table 4) and coloradoite (i, analysis 4, Table 4) with colloform pyrite. BSE-image.

Таблица 4

Химический состав самородного золота (1–3), колорадоита (4, 5) и калаверита (6) (мас. %)

Table 4

Chemical composition of native gold (1–3), coloradoite (4, 5) and calaverite (6) (wt. %)

№ п/п	Au	Te	Hg	Ag	Сумма	Формула
1	100.00	–	–	–	100.00	Au _{1.00}
2	99.75	–	–	0.07	99.82	Au _{1.00}
3	98.90	–	–	0.55	99.45	Au _{1.00}
4	–	39.60	59.99	–	99.59	Hg _{0.96} Te _{1.00}
5	–	39.69	60.11	–	99.80	Hg _{1.04} Te _{1.00}
6	43.11	56.44	–	–	99.55	Au _{0.99} Te _{2.00}

элементов достигается путем применения «диких» и адаптации искусственных штаммов бактерий (Башлыкова и др., 2005). Именно такой подход был использован при биоокислении руд Самолазовского месторождения. Однако требуемые результаты по извлечению были достигнуты только в верхней части штабеля, где развиты оксигидроксиды Fe³⁺. Причины недостаточного разрушения сульфидов заключаются в режиме биовоздействия, отражением которых являются особенности минерального состава руд в штабеле.

Морфология и механизмы образования колломорфных агрегатов. Тонкозернистые и скрытокристаллические агрегаты дисульфидов Fe в рудах Самолазовского месторождения развиты в доломит-флюорит-кварцевых жилах штокверка как наиболее поздние гидротермальные (абиоген-

ные) образования. Дисульфиды Fe формируют отдельные колломорфные и почковидные агрегаты, колломорфные каймы вокруг зернистого пирита и залечивают в нем трещины. Их морфологические особенности однозначно указывают на более позднее происхождение по сравнению с зернистым пиритом. Микроструктура этих агрегатов, в тех случаях, когда разрешающая способность оптической или электронной микроскопии позволяет ее видеть, радиально-лучистая или микро-нанозернистая (рис. 3и, к). В обоих случаях структура является результатом спонтанного образования множества центров кристаллизации либо расщепления растущих граней, связанного с захватом некогерентных примесей, возможных при быстром росте из пересыщенных растворов при относительно низких температурах (Краснова, Петров, 1995; Barrie et al.,

2009). Чем выше степень пересыщения, тем выше скорость нуклеации по отношению к скорости роста. По мере истощения растворов коллоидные агрегаты могут замещаться радиально-лучистыми кристаллическими (Barrie et al., 2009). Такие структуры пирит-марказитовых агрегатов с постепенным увеличением размера кристаллитов и обрастаниями коллоидных корок кристаллическими микрошечками присутствуют в первичных рудах Самолазовского месторождения.

Коллоидные агрегаты пирита могут иметь как абиогенное, так и биогенное происхождение (Shang et al., 2016 и ссылки в этой статье). Механизмы биогенного формирования коллоидного и нанозернистого пирита до конца не поняты, но экстремальное облегчение изотопного состава серы в некоторых образцах коллоидных пиритов доказывает участие бактериальной сульфат-редукции в поставке S^{2-} для формирования пирита (Posfai, Dunin-Barkowski, 2006). Образование вторичных биогенных сульфидов доказано экспериментально (Baas Bekking, Moore, 1961; Rickard, 1969), также они обнаружены в зонах окисления природных объектов (Belogub et al., 2008).

В кеке биовыщелачивания, наряду с отмеченными в первичных рудах зональными по размеру зерен структурами, присутствуют отдельные почки в тонкозернистых порошковых агрегатах, образование которых связывается с биоокислением, а также тонкие каймы вокруг обломков кристаллов пирита. Учитывая принудительное заселение штабеля бактериями и, соответственно, повышенную концентрацию органических веществ в поровом растворе, способствующую зарождению сульфат-редуцирующих бактерий, формирование части наиболее тонкозернистых агрегатов дисульфидов Fe в результате жизнедеятельности бактерий представляется вполне возможным.

Химический состав. Тонкозернистые агрегаты дисульфидов Fe в первичных сульфидных рудах Самолазовского месторождения обогащены широким набором примесей, включая Au, Ag, Hg, Tl, Te, As и Sb, иногда также Cu и Zn, при этом ожидаемая корреляция содержаний Au–As проявлена слабее, чем в парах Au–Tl и Au–Hg (Belogub et al., 2019). Спектроскопическими методами доказана химическая форма вхождения Au в тонкозернистый мышьяковистый пирит и преимущественная сульфидная форма Au (Filimonova et al., 2020).

Абиогенный коллоидный пирит часто несет повышенные концентрации примесей, включая As, Sb, Cu, Zn и другие металлы (Barrie et al., 2009), также, как SiO_2 и Al_2O_3 (Schiber, Riciputi, 2004). Захват металлов и полуметаллов растущим микро-нанозернистым агрегатом, по-видимому, объясняется как возможностью их вхождения в структуру пирита при достаточных пересыщениях (Barrie et al., 2009), так и захватом развитой поверхностью по механизму, близкому к адсорбции (Таусон и др., 2010, 2015). Концентрация примесей в пирите зависит, с одной стороны, от их концентрации в растворе, с другой – от скорости роста. При медленном росте, особенно при низких температурах, количество структурных примесей подчиняется кристаллохимическому контролю и зависит от изоморфной емкости соединения при заданной температуре (Краснова, Петров, 1997). Источником повышенных концентраций примесей в предположительно биогенном пирите кека выщелачивания могут быть тонко-мелкозернистые агрегаты позднего гидротермального пирита, а их геохимический спектр может быть унаследован.

Присутствие примеси петрогенных оксидов иногда связывают с псевдоморфным замещением силикатов сульфидами (Schiber, Riciputi, 2004). Однако в кеке биоокисления нами зафиксированы каймы коллоидного пирита с примесью кремнезема (см. рис. 3ж), образование которых может быть связано только с соосаждением сульфида Fe и опала.

Вертикальная зональность штабеля визуально проявлена в ожелезнении исключительно его приповерхностной части. Учитывая присутствие в составе руд доломита, можно констатировать, что в средней и нижней части штабеля не был достигнут необходимый для жизнедеятельности бактерий уровень кислотности среды. О нейтрализации растворов свидетельствует также наличие корочек вторичного карбоната и новообразованного гипса, устойчивого при $pH \geq 5.5$, и частичная сохранность флюорита. Можно предположить, что в присутствии органических продуктов жизнедеятельности бактерий, локальных участков с затрудненным доступом кислорода, например, в результате развития гипса, создавались и сохранялись восстановительные условия, комфортные для сульфат-редуцирующих бактерий, деятельность которых способствовала формированию биогенных коллоидных дисульфидов Fe, обогащенных примесями.

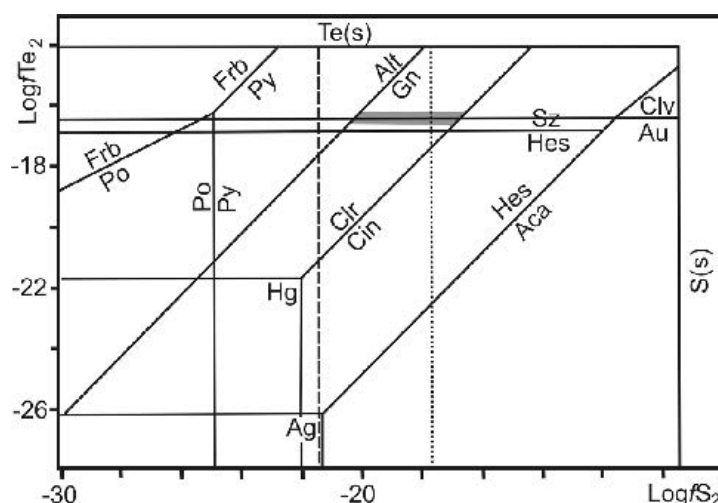


Рис. 6. Диаграмма $\log f\text{Te}_2 - \log f\text{S}_2$ для некоторых сульфидов и теллуридов при 100 °C (Afifi et al., 1988).

Темно-серое – поле устойчивости золото-калаверит-колорадоитовой ассоциации. Alt – алтаит, Clv – калаверит, Au – самородное золото, Hes – гессит, Аса – акантит, Clr – колорадоит, Cin – киноварь, Hg – ртуть, Sz – штольцит, Frb – фробергит, остальные аббревиатуры см. в разделе Методика работ. Пунктирная линия – реакция магнетит + S2 = пирит + гематит; точечная линия – реакция галенит + гематит = пирит + англезит.

Fig. 6. $\log f\text{Te}_2 - \log f\text{S}_2$ plot for some sulfides and tellurides at 100 °C (Afifi et al., 1988).

Dark gray – stability field of native gold-calaverite-coloradoite assemblage. Alt – altaite, Clv – calaverite, Au – native gold, Hes – hessite, Aca – acanthite, Clr – coloradoite, Cin – cinnabar, Hg – mercury, Sz – stolzite, Frb – frobergite. For other abbreviations, see Methods. Dotted line – reaction magnetite + S2 = pyrite + hematite; point line – reaction galena + hematite = pyrite + anglesite.

Золото и теллуриды. С колломорфными дисульфидами Fe на Самолазовском месторождении ассоциируют микровыделения ассоциации золота и теллуридов. Поле устойчивости золото-теллуридной минерализации определяется относительно высокой фугитивностью Te, достаточной для образования дителлуридов Au (рис. 6) и ограничивается линиями раздела алтаит-галенит и колорадоит-киноварь. При понижении температуры поля устойчивости теллуридов сдвигаются в область более высокой фугитивности Te, по сравнению с S (Afifi et al., 1988). По-видимому, с этим связаны редкие находки теллуридов и преимущественная сульфидная форма нахождения золота. Достижение таких высоких значений фугитивности Te в техногенных условиях проблематично. Однако перекрытие области устойчивости золото-теллуридной ассоциации с областью устойчивости англезита не противоречит предположению о техногенном происхождении хотя бы части колломорфного пирита с включениями золота и теллуридов.

Извлечение золота цианидными растворами из первичных сульфидных руд, по данным ПАО «Селигдар», составляло около 25–30 %. Применение бактерий для окисления руд в лабораторных условиях позволило значительно его увеличить,

что и послужило основанием для организации натурного эксперимента. После 3 лет периодического орошения бактериальной культурой и кислотой, извлечение золота из руд верхней части штабеля достигло уровня >80 %, при том, что в средней-нижней части оно было почти вдвое ниже. Однако на четвертый год извлечение цианированием упало на 15 %. Наиболее вероятно, резкое ухудшение показателей эффективности произошло из-за нейтрализации растворов в средней-нижней части штабеля, в результате чего произошло массовое образование водоупорных агрегатов глинисто-гипсового и карбонатного состава, что и является основным фактором, препятствующим извлечению золота. Вероятно, свой вклад в ухудшение показателей эффективности вносит формирование на поверхности свободного золота минеральных пленок, подобно описанным ранее в продуктах автоклавного биовыщелачивания руд золота пленкам гипса и ярозита (Ofori-Sarpong et al., 2020).

Заключение

В результате изучения кека биовыщелачивания первичных сульфидных руд Самолазовского месторождения после четырех лет периодического

полива культурой биоорганизмов в штабеле сформировалась вторичная зональность, проявленная в развитии в верхней приповерхностной части штабеля оксигидроксидов Fe и глинистых продуктов изменения породообразующих минералов, в средней–нижней – корок вторичного кальцита с примесью Mg. Распространение гипса указывает на умеренно-кислые – нейтральные условия ($\text{pH} \geq 5.5$), существовавшие в основном объеме штабеля. Источником Са для формирования гипса послужил неустойчивый в кислых условиях доломит. Сметиты являются продуктом кислотного разложения калиевого полевого шпата. В ультракислых условиях по КППШ образуется каолинит, отсутствующий в изученных пробах, поэтому условия изменения КППШ были умеренно-кислыми.

Повышение pH в штабеле, связанное с нейтрализующим влиянием карбонатов, неблагоприятно действовало на активность ацидофильных сульфидоокисляющих бактерий. В свою очередь, плотные пленки оксигидроксидов Fe, образующиеся на поверхности рудных минералов и цементирующие глинистые минералы, и агрегаты гипса и глинистых минералов снижают проницаемость руды и штабеля в целом. Перечисленные факторы препятствуют эффективному окислению сульфидов, что приводит к уменьшению извлечения.

Сульфидная минерализация первичных руд в основном объеме штабеля хорошо сохраняется. Сульфиды представлены преимущественно зернистым пиритом и более редкими халькопиритом, галенитом, блеклой рудой, сфалеритом. В руде кека биовыщелачивания также встречаются фрагменты тонковкрапленных сульфидных руд с футляровидными дисульфидами Fe. Структуры сульфидных руд соответствуют изученным ранее первичным рудам Самолазовского месторождения с некоторым уменьшением доли микрозернистых разновидностей.

Кроме перечисленных выше, в кеке встречаются колломорфные, ботриoidalные скрытокристаллические агрегаты и единичные микроконкреции. В их составе присутствуют примеси As, Ni, Cu, иногда SiO_2 . Находки отдельных сферических тонкокристаллических почек диаметром до 10 мкм в массе дробленной до тонкого песка породы свидетельствуют об их росте после дробления руд, по-видимому, в результате деятельности бактерий.

Золото высокой пробности выявлено в ассоциации с колорадоитом и калаверитом только в виде включений в колломорфных дисульфидах Fe, что может свидетельствовать в пользу вторичного

(техногенного) происхождения хотя бы части самородного золота.

Работы поддержаны ПАО «Селигдар». Часть аналитических исследований выполнена в рамках госбюджетной темы № 122031600292-6.

Литература

- Алборов И.Д., Гегуева М.М., Касумов Ю.Н., Козырев Е.Н., Созаев В.А. (2018) Биоготехнология золотосодержащих руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 6, 126–133.
- Башлыкова Т.В., Пахомова Г.А., Лагов Б.С., Живасева А.Б., Дорошенко М.В., Макавецкас А.Р., Шульга Т.О. (2005) Биотехнологии минерального сырья / Технологические аспекты рационального природопользования. Ред. Ю.С. Карабасова. М., МИСИС, с. 387–478.
- Казанский В.И. (2004) Уникальный Центрально-Алданский золото-урановый рудный район (Россия). *Геология рудных месторождений*, 46(3), 195–211.
- Краснова Н.И., Петров Т.Г. (1995) Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб, Невский курьер, 228 с.
- Леонтьев В.И., Бушуев Я.Ю., Черниговцев К.А. (2018) Самолазовское золоторудное месторождение (Центрально-Алданский район): геологическое строение и особенности оруденения глубоких горизонтов. *Региональная геология и металлогения*, 75, 90–103.
- Монгуш Г.Р. (2010) Применение биотехнологии для переработки месторождений полезных ископаемых Тувы. *Новые исследования Тувы*, 1, 228–242.
- Таусон В.Л., Пастушкова Т.М., Бабкин Д.Н., Краснощекова Т.С., Лустенберг Э.Е. (2010) Зависимость концентрации микроэлемента от размера кристалла в пробе. *Геология и геофизика*, 51(7), 981–992.
- Таусон В.Л., Рычагов С.Н., Акимов В.В., Липко С.В., Смагунов Н.В., Герасимов И.Н., Давлетбаев Р.Г., Логинов Б.А. (2015) Роль поверхностных явлений в концентрировании некогерентных элементов: золото в пиритах гидротермальных глин термальных полей Южной Камчатки. *Геохимия*, 11, 1000–1014.
- Яхонтова Л.К., Зверева В.П. (2000) Основы минералогии гипергенеза: Учебное пособие. Владивосток, Дальнаука, 336 с.
- Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. (1988) Phase relations among tellurides, sulfides and oxides: I Thermochemical data and calculated equilibria. *Economic Geology*, 83(2), 377–394.
- Baas Becking L.G.M., Moore D. (1961) Biogenic silfides. *Economic Geology*, 56(2), 259–272.
- Barrie C.D., Boyce A.J., Boyle A.P., Williams P.J., Blake K., Ogawara T., Akai J., Prior D.J. (2009) Growth controls in colloform pyrite. *American Mineralogist*, 94(4), 415–429.

Belogub E., Novoselov K., Artemev D., Filimonova O. (2019) Impurities in pyrite from the gold deposits of Central Aldan ore area (Sakha-Yakutia): study using LA ICP-MS. *Proceedings of the 15th SGA Biennial Meeting on Mineral Deposit Research*. Glasgow, vol. 2, 818–821.

Belogub E.V., Novoselov K.A., Yakovleva V.A., Spiro B. (2008) Supergene sulphides and related minerals in the supergene profiles of VHMS deposits from the South Urals. *Ore Geology Reviews*, **33**(3–4), 239–254.

Filimonova O.N., Tagirov B.R., Trigub A.L., Nickolsky M.S., Rovezzic M., Belogub E.V., Reukov V.L., Vikentyev I.V. (2020) The state of Au and As in pyrite studied by X-ray absorption spectroscopy of natural minerals and synthetic phases. *Ore Geology Reviews*, **121**, 103475.

Fomchenko N.V., Muravyov M.I., Kondrat'eva T.F. (2010) Two-stage bacterial-chemical oxidation of refractory gold-bearing sulfidic concentrates. *Hydrometallurgy*, **101** (1–2), 28–34.

Miller P., Brown A.R.G. (2016) Bacterial oxidation of refractory gold concentrates. In: *Gold ore processing (Second edition)*. Ed. by M.D. Adams. Singapore, Fugue Pte Ltd, p. 359–372.

Ofori-Sarpong G., Adam A.-S., Asamoah R.K., Amankwah R.K. (2020) Characterisation of biooxidation feed and products for improved understanding of biooxidation and gold extraction performance. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, **5**(2), 20–29.

Posfai M., Dunin-Borkowsky R. (2006) Sulfides in biosystems. In: *Sulfide mineralogy and geochemistry. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **61**, 679–714.

Rawlings D.E. (2004) Microbially-assisted dissolution of minerals and its use in the mining industry. *Pure Applied Chemistry*, **76**(4), article no. 847.

Rickard D.T. (1969) The microbiological formation of iron sulphides. In: *Stockholm's contrib.*, Geol., **20**, 49–66.

Schieber J., Riciputi L. (2004) Pyrite ooids in Devonian black shales record intermittent sea-level drop and shallow-water condition. *Geology*, **23**(4), 305–308.

Shang G., Fei H., Yinghui W., Wenyuan G. (2016). A review of research progress in the genesis of colloform pyrite and its environmental indications. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, **90**(4), 1353–1369.

Yannopoulos J. C. (1991) The extractive metallurgy of gold. New York, Von Nostrand Reinhold, 281 p.

References

Affi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. (1988) Phase relations among tellurides, sulfides and oxides: I Thermochemical data and calculated equilibria. *Economic Geology*, **83**(2), 377–394.

Alborov I.D., Gegueva M.M., Kasumov Yu.N., Kozyrev E.N., Sozaev V.A. (2018) [Biogeotechnology of gold-bearing ores]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Information and Analytical Bulletin]*, **6**, 126–133. (in Russian)

Baas Becking L.G.M., Moore D. (1961) Biogenic silfides. *Economic Geology*, **56**(2), 259–272.

Barrie C.D., Boyce A.J., Boyle A.P., Williams P.J., Blake K., Ogawara T., Akai J., Prior D.J. (2009) Growth controls in colloform pyrite. *American Mineralogist*, **94**(4), 415–429.

Bashlykova T.V., Pakhomova G.A., Lagov B.S., Zhivaeva A.B., Doroshenko M.V., Makavetskas A.R., Shulga T.O. (2005) [Biotechnologies of raw materials]. In: *Tekhnologicheskiye aspekty ratsional'nogo prirodopol'zovaniya [Technological Aspects of Environmental Management]*. Ed. by Yu.S. Karabasov. Moscow, MISIS, 387–478. (in Russian)

Belogub E., Novoselov K., Artemev D., Filimonova O. (2019) Impurities in pyrite from the gold deposits of Central Aldan ore area (Sakha-Yakutia): study using LA ICP-MS. *Proceedings of the 15th SGA Biennial Meeting on Mineral Deposit Research*. Glasgow, vol. 2, 818–821.

Belogub E.V., Novoselov K.A., Yakovleva V.A., Spiro B. (2008) Supergene sulphides and related minerals in the supergene profiles of VHMS deposits from the South Urals. *Ore Geology Reviews*, **33**(3–4), 239–254.

Filimonova O.N., Tagirov B.R., Trigub A.L., Nickolsky M.S., Rovezzic M., Belogub E.V., Reukov V.L., Vikentyev I.V. (2020) The state of Au and As in pyrite studied by X-ray absorption spectroscopy of natural minerals and synthetic phases. *Ore Geology Reviews*, **121**, 103475.

Fomchenko N.V., Muravyov M.I., Kondrat'eva T.F. (2010) Two-stage bacterial-chemical oxidation of refractory gold-bearing sulfidic concentrates *Hydrometallurgy*, **101**(1–2), 28–34.

Kazansky V.I. (2004) [Unique Central Aldan gold-uranium ore region (Russia)]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **46**(3), 195–211. (in Russian)

Krasnova N.I., Petrov T.G. (1995) [Genesis of mineral individuals and aggregates]. St. Petersburg, Nevsky kur'er, 228 p. (in Russian)

Leontiev V.I., Bushuev Ya.Yu., Chernigovtsev K.A. (2018) [Samolazovskoe gold deposit (Central Aldan region): geological structure and features of mineralization of deep horizons]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]*, **75**, 90–103. (in Russian)

Miller P., Brown A.R.G. (2016) Bacterial Oxidation of Refractory Gold Concentrates. In: *Gold ore processing (Second edition)*. Ed. by M.D. Adams. Singapore, Fugue Pte Ltd, 359–372.

- Mongush G.R. (2010)** [Application of biotechnology for processing of mineral deposits in Tuva]. *Novyye issledovaniya Tuvy [New Studies of Tuva]*, **1**, 228–242. (in Russian)
- Ofori-Sarpong G., Adam A.-S., Asamoah R. K., Amankwah R. K. (2020)** Characterisation of biooxidation feed and products for improved understanding of biooxidation and gold extraction performance. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, **5**(2), 20–29.
- Posfai M., Dunin-Borkowsky R. (2006)** Sulfides in biosystems. *Sulfide mineralogy and geochemistry. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **61**, 679–714.
- Rawlings D.E. (2004)** Microbially-assisted dissolution of minerals and its use in the mining industry. *Pure Applied Chemistry*, **76**(4), article no. 847.
- Rickard D.T. (1969)** The microbiological formation of iron sulphides. In: *Stockholm's contrib.*, Geol., **20**, 49–66.
- Schieber J., Riciputi L. (2004)** Pyrite ooids in Devonian black shales record intermittent sea-level drop and shallow-water condition. *Geology*, **23**(4), 305–308.
- Shang G., Fei H., Yinghui W., Wenyan G. (2016)** A review of research progress in the genesis of colloform pyrite and its environmental indications. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, **90**(4), 1353–1369.
- Tauson V.L., Pastushkova T.M., Babkin D.N., Krasnoshchekova T.S., Lustenberg E.E. (2010)** The effect of the crystal size in sample on the trace-element concentration. *Russian Geology and Geophysics*, **51**(7), 764–773.
- Tauson V.L., Rychagov S.N., Akimov V.V., Lipko S., Smagunov N.V., Gerasomov I.N., Rychagov S.N., Davletbaev R.G., Loginov B.A. (2015)** Role of surface phenomena in concentrating incompatible elements: Au in pyrite from hydrothermal clays at thermal fields in Southern Kamchatka. *Geochemistry International*, **53**(11), 973–986.
- Yakhontova L.K., Zvereva V.P. (2000)** [Basics of mineralogy of supergenesis: Textbook]. Vladivostok, Dal'nauka, 336 p. (in Russian)
- Yannopoulos J. C. (1991)** The extractive metallurgy of gold. New York, Von Nostrand Reinhold, 281 p.