

УДК 622.7

**ПИРОСУЛЬФИДИРОВАНИЕ ОКИСЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ СВИНЦА И ЦИНКА
ПИРИТСОДЕРЖАЩЕЙ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОЙ РУДОЙ**

И. Г. Антропова¹, А. А. Меринов¹, П. А. Гуляшинов¹, Б. Б. Дамдинов²

¹Байкальский институт природопользования СО РАН,
ул. Сахьяновой, 6, 670047, г. Улан-Удэ, Россия

²Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН,
E-mail: inan@binm.ru, ул. Сахьяновой, 6, 670047, г. Улан-Удэ, Россия

Показана перспективность совместного обжига труднообогатимых окисленных и сульфидных свинцово-цинковых руд Озерного месторождения на стадии подготовки сырья к флотации. При совместном обжиге окисленной свинцово-цинковой руды с сульфидной рудой при 650–700 °С происходит селективное окисление пирита с образованием серосодержащих агентов и сульфидирование труднообогатимых окисленных минералов свинца и цинка. Экспериментально доказано, что селективное окисление пирита сопровождается дезинтеграцией по межфазным границам сульфидных минералов свинца и цинка. Основными продуктами взаимодействий являются ZnS, PbS, Fe₃O₄, Fe₂O₃, что значительно облегчит дальнейшее флотационное обогащение. Использование предлагаемого способа переработки полиметаллических руд позволит вовлечь в производство не только окисленные свинцово-цинковые руды, но и труднообогатимые сульфидные, увеличить срок работы горнодобывающего предприятия и снизить техногенную нагрузку на окружающую среду. Образцы охарактеризованы методами рентгенофазового анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии, оптической микроскопии, химического анализа и методом Ритвельда с использованием программы TOPAS.

Окисленные свинцово-цинковые руды, сульфидная руда, сульфидизирующий обжиг, немеханическая дезинтеграция, Озерное месторождение

DOI: 10.15372/FTPRPI20230313

В полиметаллических месторождениях Республики Бурятия (Западное Забайкалье) сосредоточено 26.1 % запасов свинца России и 50.9 % запасов цинка [1–3]. В настоящее время в стадии подготовки к разработке находится Озерное месторождение полиметаллических руд, расположенное в 350 км от озера Байкал (не входит в его охранную зону). Месторождение Озерное — второе по запасам цинка в России — отличается благоприятными условиями отработки, удобным географическим положением. Состав руд свинцово-цинковый при почти полном отсутствии меди — соотношение Pb:Zn:Cu равно 1:6:0.05 [4]. Запасы полиметаллических руд месторожде-

Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН (проект № АААА-А21-121011890003-4) с использованием оборудования ЦКП БИП СО РАН и ГИН СО РАН (Улан-Удэ). Петрографо-минераграфическое изучение исходных проб сульфидной руды Озерного месторождения и огарка проведено в рамках гранта РФФИ № 22-17-00106.

ния оцениваются почти в 157 млн т при среднем содержании цинка 6.16 %, свинца — 1.17 %, кадмия — 0.017 %, серебра — 35 г/т. Ввод в эксплуатацию обогатительного комбината Озерного месторождения с мощностью 6 млн т руды в год запланирован на начало 2024 г.

Озерное месторождение является комплексным, основную промышленную ценность его составляют колчеданно-полиметаллические руды [5–9]. Однако сульфидные руды Озерного по минеральному и фазовому составу неоднородные и сложные, характеризуются увеличением доли труднообогатимых руд с тонкой вкрапленностью минералов свинца, цинка, железа и повышенным содержанием тонких сростаний сульфидных минеральных форм. Главные рудные минералы — пирит и сфалерит, менее распространен галенит. Среди нерудных минералов преобладают сидерит, кальцит, доломит, барит, кварц. Основная масса руд тонкозернистая и скрытокристаллическая. Зона окисления мощностью 20–30 м развита на месторождении повсеместно. По зонам разломов она развивается до глубины 50–70 м [1, 8]. В составе окисленных руд преобладают гидроксиды железа, свинец и цинк представлены преимущественно сульфатами, оксидами и карбонатами – плюмбоярозитом, церусситом и гетеролитом. Содержание свинца в окисленных рудах изменяется от 0.3 до 20 %, цинка от 0.3 до 1.8 %.

Институт ООО “СПб-Гипрошахт” в 2020 г. выполнил технико-экономический расчет по Озерному ГОКу и его инфраструктуре. Для месторождения предложена флотационная схема обогащения руд. В результате обогащения будут получены четыре продукта: цинковый и свинцовый концентраты, пиритный промпродукт и отвальные хвосты флотации. Первые два концентрата — товарная продукция. Вопросы использования окисленных руд не нашли проектного решения. Запасы окисленных руд составляют 5788 тыс. т, и эти руды планируется складировать в контуре карьера месторождения Озерное в отдельный склад окисленных руд под открытым небом.

В большинстве случаев окисленные руды тяжелых цветных металлов относятся к категории труднообогатимых. Для переработки таких руд, практически не поддающихся флотации, целесообразно применение комбинированных схем, включающих операции гидро- или пирометаллургии [10–24]. Так, для переработки труднообогатимой окисленной руды, содержащей бедантит, плюмбоярозит, предложена комбинированная схема, включающая на первом этапе обжиг руды при 600–700 °С в целях вскрытия сложных минералов (образование микротрещин) и разложения плюмбоярозита с образованием сульфата и оксида свинца, далее выщелачивание огарка раствором NaCl. Недостатки данного метода — сочетание в одной схеме процессов обжига, выщелачивания, осаждения и т. п.; относительно невысокое извлечение свинца в раствор (до 85 %). Китайскими учеными для извлечения ценных металлов из окисленной свинцово-цинковой руды (провинция Юньнань) разработана технология, использующая обжиг с пиритом и углем [21]. К недостаткам данной технологии следует отнести использование чистого пирита в качестве сульфидизатора. В [22, 23] в качестве сульфидизатора предлагается использовать серу, также исследуется возможность пиросульфидирования оксидов цинка с элементной серой в присутствии угля и оксидов железа [24]. Показано, что процесс сульфидирования в присутствии угля способствует уменьшению образования сернистого газа. Образующиеся сульфиды железа в изученной системе также могут участвовать в сульфидировании.

Ранее авторами был предложен способ подготовки окисленных свинцово-цинковых руд разных типов к флотационному обогащению, основанный на пиросульфидировании окисленных минералов цветных металлов в атмосфере водяного пара с помощью некондиционных пиритных концентратов [25, 26]. Слабыми сторонами этого способа является разубоживание исходных руд по ценным компонентам из-за применения в качестве сульфидизатора некондиционных пиритных концентратов и большое содержание сероводорода в отходящих газах.

Цель настоящей работы — изучение процесса сульфидизирующего обжига труднообогатимой окисленной свинцово-цинковой руды Озерного месторождения без подвода воды извне с использованием в качестве сульфидизатора труднообогатимой тонкозернистой сульфидной свинцово-цинковой руды того же месторождения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данные порошковой рентгеновской дифракции (РФА) для идентификации фаз получены на рентгеновском порошковом дифрактометре Bruker D8 ADVANCE (Cu-K α -излучение) и линейном детекторе VANTEC. Количественный фазовый анализ и уточнение параметров элементарных ячеек проводились путем подгонки профиля рентгеновской дифракции по методу Ритвельда с использованием программы TOPAS 3.1. Петрографо-минераграфическое изучение руд и огарков выполнялось на оптическом микроскопе Olympus VX-51. Термический анализ смеси окисленной и сульфидной свинцово-цинковой руды осуществлялся с помощью термогравиметрического дифференциального сканирующего калориметрического метода (ТГ-ДТА/ДСК) на термоанализаторе Jupiter STA 449C фирмы Netzsch. Термограммы снимались в платиновом тигле, в атмосфере аргона, образец нагревался до 850 °С со скоростью 10 град/мин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование исходных проб. Объектами исследования служили технологические пробы окисленных и сульфидных руд Озерного месторождения. По данным количественного фазового анализа (рис. 1а) установлено, что основными минеральными составляющими пробы окисленной руды являются гетит FeOОН, кварц SiO₂, плюмбоярозит PbFe₆(OH)₁₂(SO₄)₄ и церуссит PbCO₃. Цинк и марганец представлены гетеролитом ZnMn₂O₄, массовая доля которого в пробе руды составляет около 0.15 %.

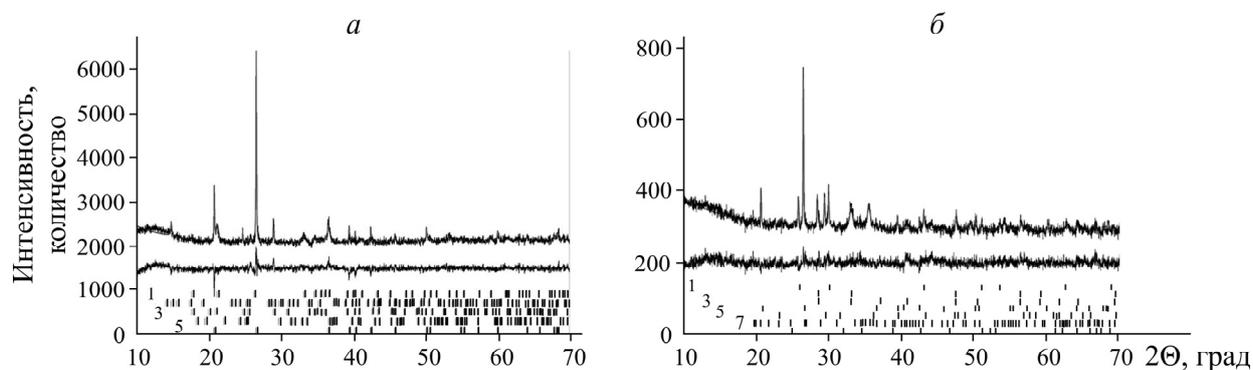


Рис. 1. Рентгенофазовый анализ окисленной пробы (а) и сульфидной руды, уточненный методом Ритвельда (б), %: а — 1 — гетит (39.72); 2 — плюмбоярозит (16.8); 3 — церуссит (1.49); 4 — гетеролит (0.15); 5 — кварц (42.56); б — 1 — галенит (1.0); 2 — сфалерит (9.04); 3 — пирит (38.23); 4 — кварц (16.51); 5 — кальцит (29.89); 6 — мусковит (2.96); 7 — сидерит (2.37)

Основные рудные минералы сульфидной пробы — пирит FeS₂, сфалерит ZnS и галенит PbS (рис. 1б). Породообразующие минералы представлены кальцитом CaCO₃, кварцем SiO₂, в небольшом количестве сидеритом FeCO₃ и мусковитом KAl₂(AlSi₃O₁₀)·(OH)₂.

По данным химического анализа, ценными компонентами пробы окисленной руды являются свинец (4.11 %) и серебро (120 г/т). Массовая доля железа (Fe_{общ}) составляет 29.73 %. Эта проба оказалась бедной по содержанию цинка (0.04 %) и марганца (0.07 %). Основная химическая составляющая руды — оксид кремния (42.56 %).

Ценные компоненты в пробе сульфидных руд представлены цинком (6.07%), свинцом (0.87%) и серебром (25 г/т). Содержание $Fe_{общ}$ в исследуемой пробе сульфидной руды равно 18.97%, содержания оксидов кремния и кальция — 17.97 и 16.74% соответственно.

Для подтверждения труднообогатимости сульфидных проб руды проведен петрографо-минераграфический анализ двух штучных кусков пород, используемых в исследованиях. Анализ шлифа и аншлифа показал (рис. 2а), что первая проба по структурно-морфологическому типу относится к слоисто-полосчатым колчеданным рудам, которые слагают 23% запасов Озерного месторождения. Микроопределение в шлифе — серицит-кварц-карбонат-сульфидная порода с обломками андезитов, известняков и гранитоидов. Основная масса породы сложена рудными минералами (сульфидами), преимущественно пиритом и сфалеритом. В сульфидной массе развиваются отдельные чешуйки мусковита (серицита), выделения кварца и карбонатов, а также агрегаты кварц-серицит-карбонатного состава.

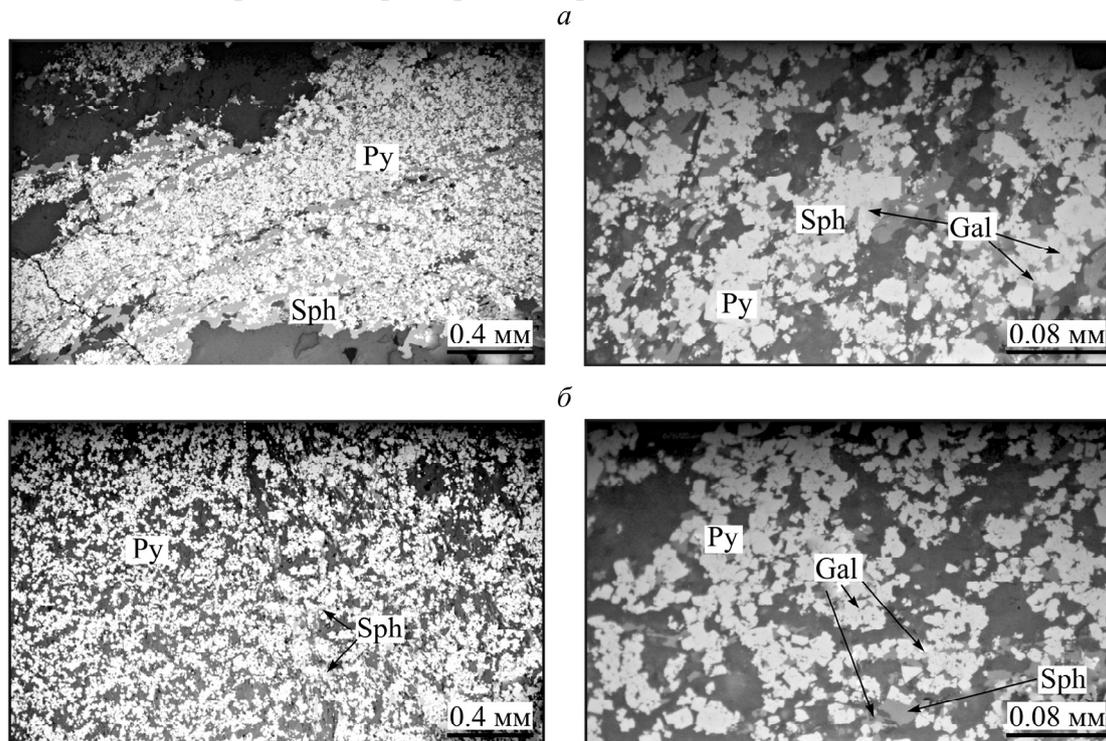


Рис. 2. Аншлиф 1 (а) и 2 (б) пробы сульфидной руды Озерного месторождения: Py — пирит; Sph — сфалерит; Gal — галенит

Рудные минералы вытянуты в полосовидные агрегаты, сложенные тонкозернистыми сростаниями главных сульфидных минералов — пирита и сфалерита, с примесью галенита (в составе пиритовых агрегатов) и халькопирита в виде редких зерен. Сливные полосовидные агрегаты сфалерита содержат внутри большое количество вростков или выделений гипидиоморфных кристаллов пирита. Размерность зерен пирита от 4 до 40 мкм. Кристаллические агрегаты пирита сливаются, образуя скопления внутри сфалерита. Эти скопления ориентированы согласно общей полосчатости руды. Между скоплениями пирита остаются прожилковидные участки сфалерита. Выделения пирита тяготеют к полосам сфалерита, однако в нерудной основной массе встречаются участки с редкой тонкой вкрапленностью пирита, размерность которого 1–3 мкм. По краям полосовидных сфалерит-пиритовых агрегатов развиты выделения сфалерита размером 100–150 мкм, изометричной неправильной формы, с малым количеством

вростков пирита либо без них. Такие зерна содержат редкую эмульсионную вкрапленность халькопирита (структура распада твердого раствора). Отдельные зерна сфалерита встречаются также в основной нерудной массе.

Галенит слагает мелкие (2–30 мкм) ксеноморфные выделения в межзерновых пространствах скоплений пирита, которые относительно равномерно распределены в пиритовом агрегате. Выделения галенита видны только в большом увеличении (объектив 50х). Также галенит встречается в виде редких зерен размером 50–70 мкм, иногда в сростании со сфалеритом.

Анализ второй пробы показал, что по структурно-морфологическому типу он относится к массивной сульфидной руде (рис. 2б). Микроопределение в шлифе — серицит-кварц-карбонат-сульфидная порода. Шлиф разделен примерно на две половины, различающиеся по зернистости, в одной половине мелкозернистый агрегат, в другой зернистость чуть больше по размеру. В шлифе равномерно распределены количественно преобладающие рудные минералы — пирит и сфалерит. В межзерновых пространствах рудных минералов присутствует агрегат серицит-кварц-карбонатного состава. Зерна нерудных минералов ориентированы в одном направлении. Мусковит слагает тонкие пластинки толщиной около 5 мкм, длиной 30–40 мкм. Карбонат образует изометричные, иногда вытянутые зерна ксеноморфной формы, заполняющие промежутки между сульфидами. Кварц слагает зерна вытянутой иногда изометричной формы, образующие кварц-карбонатные агрегаты. Размер отдельных зерен кварца 40–60 мкм, редко 100 мкм.

Поверхность данного аншлифа сложена сплошным агрегатом пирита и сфалерита, массивной текстуры. Распределение рудных минералов равномерное. Примерно посередине аншлифа проходит граница между участками, немного различающимися по зернистости и содержанию рудных минералов. Граница видна визуально, однако микроскопически проявлена хуже вследствие небольшой разницы в содержаниях рудных минералов (разница 1–3 об.%). Пирит слагает сплошной тонкозернистый агрегат гипидиоморфных зерен и их сростков, состоящих из нескольких зерен. Средняя размерность зерен пирита 5–20 мкм. В другом участке аншлифа размерность зерен пирита чуть больше, в среднем 10–25 мкм, немного выше содержание нерудных минералов (за счет большей зернистости породы).

Сфалерит в “мелкозернистой” части аншлифа содержится в меньшем количестве, чем в “крупнозернистой”. Образует здесь мелкие зерна размером около 5 мкм или более крупные, до 50–70 мкм в поперечнике, содержащие многочисленные вростки гипидиоморфных кристаллов пирита. В крупнозернистой части породы зерна сфалерита более крупные, их количество больше, имеют вытянутую форму, также содержат многочисленные вростки гипидиоморфных кристаллов пирита. Размерность зерен сфалерита 50–105 мкм в поперечнике. Относительно мелкие зерна удлиненные, более крупные — изометричные.

Галенит слагает ксеноморфные выделения в скоплениях кристаллов пирита. Наблюдается только при большом увеличении, размерность зерен 2–5 мкм. Для исследованных проб сульфидных руд Озерного месторождения характерно тесное прораствание сульфидов между собой, преобладающая малая крупность зерен (1–50 мкм) и относительно простой минералогический состав. Как правило, такие сульфидные руды перед флотацией вскрываются в процессе очень тонкого измельчения (до 2–50 мкм), и при их флотации не всегда достигаются приемлемые показатели извлечения [27–31].

Эффективность переработки труднообогатимых плюмбоярозитсодержащих окисленных и сульфидных свинцово-цинковых руд может быть достигнута предварительным их совместным обжигом на стадии подготовки данного сырья к дальнейшей флотации. В традиционную флотационную схему сульфидов добавится только один передел — немеханический метод селективной дезинтеграции и активирования сложных минеральных комплексов, обжиг.

Результаты экспериментов по совместному обжигу труднообогатимых окисленных и сульфидных свинцово-цинковых руд. Изучение взаимодействия окисленной руды с сульфидной осуществлялось с помощью термического анализа и их совместным обжигом с последующим анализом огарков методом РФА. Количество сульфидной свинцово-цинковой руды (сульфидизатор) взято 30 % от массы шихты, что составляет 100 % серы пиритной от суммарного содержания свинца и цинка в окисленной руде. Данное количество пиритсодержащей свинцово-цинковой руды является оптимальным с точки зрения максимального коэффициента использования пирита в качестве сульфидизатора.

Эндотермический пик на дифрактограмме (рис. 3а) при 280–290 °С соответствует дегидратации гетита с образованием гематита в системе. Данный процесс сопровождается выделением структурной воды, потеря массы составила 7 %. Второй эндоэффект (540 °С) соответствует началу разложения плюмбоарозита с образованием основного сульфата свинца и выделением структурной воды. Потери массы свыше 400 °С связаны с разложением церуссита и мусковита. Экзоэффект при 405 °С и выше связан со взаимодействием продуктов разложения пирита с перегретым водяным паром с образованием сероводорода и оксидов железа. В интервале 580–640 °С наблюдается второй экзоэффект, который, возможно, связан с образованием сульфидов свинца и цинка за счет взаимодействия серосодержащих агентов с продуктами разложения плюмбоарозита, церуссита и гетеролита.

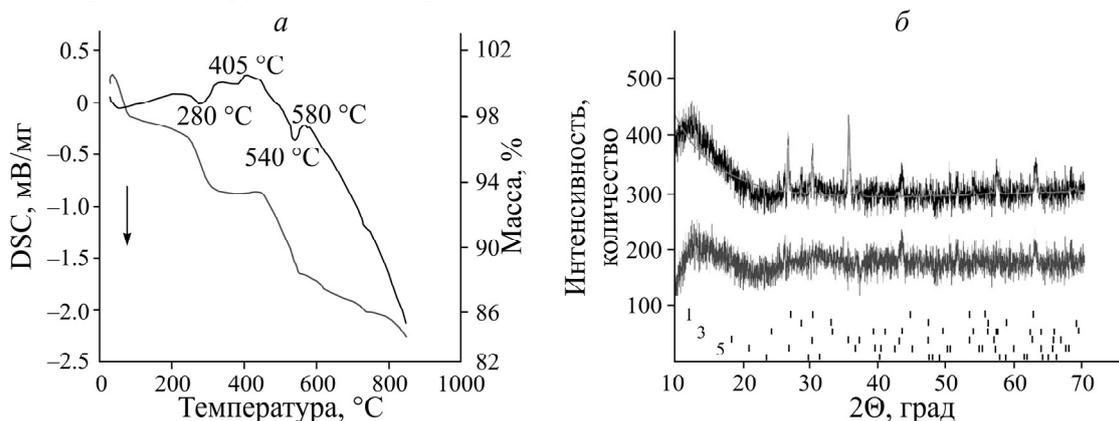


Рис. 3. ТГ- и ДСК-кривые шихты из окисленной свинцово-цинковой руды с сульфидной (а); РФА материала после синхронного термического анализа (б), %: 1 — галенит (0.86); 2 — сфалерит (6.02); 3 — гематит (64.63); 4 — магнетит (3.4); 5 — кварц (21.11); 6 — кальцит (5.06)

По данным РФА, материал после синхронного термического анализа (нагревание до 850 °С) представлен сфалеритом, галенитом, магнетитом, кварцем и в небольшом количестве гематитом (рис. 3б). Фазы с кислородными минералами свинца и цинка не обнаружены.

Экспериментальные исследования по сульфидизирующему обжигу окисленной руды с использованием в качестве сульфидизатора пиритсодержащей свинцово-цинковой руды проводились на лабораторной установке проточного типа. Методика эксперимента заключалась в следующем. Рабочую печь нагревали до заданной температуры, затем вводили лодочку с измельченной шихтой крупности – 0.25 мм и массой 1.5 г. Также исследования по обжигу проводились в печи шахтного типа на навеске 60 г.

Результаты рентгенофазового анализа продуктов реакции (таблица) показали, что при обжиге окисленной руды с сульфидной первичной стадией взаимодействия является разложение гетита с образованием гематита и выделением структурной воды. При температуре 650 °С и продолжительности обжига 15 мин продукты реакции представлены смесью ZnS, PbS, Fe₂O₃, FeS_{2(сл)}. Для полного окисления пирита требуется увеличение продолжительности обжига

до 30 мин и/или повышение температуры до 700 °С. Конечными железосодержащими фазами, по данным количественного фазового анализа (рис. 4), при 650 °С и 30 мин обжига являются гематит (54.44 %) и магнетит (1.62 %). Вновь образованные сульфиды свинца и цинка, галенит, сфалерит в составе шихты в условиях эксперимента не претерпевают изменений. Обнаружено, что один из минералов породы — кальцит частично реагирует с сернистым газом, выделяющимся при обжиге с получением сульфата кальция. Это делает процесс более экологичным.

Данные рентгенофазового анализа продуктов реакции

T, °С	Обнаруженные соединения при $t_{\text{обж}}$, мин	
	15	30
650	ZnS, PbS, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , FeS ₂ (след), SiO ₂ , CaCO ₃	ZnS, PbS, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ , CaCO ₃ , CaSO ₄
700	ZnS, PbS, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ , CaCO ₃ , CaSO ₄	ZnS, PbS, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ , CaCO ₃ , CaSO ₄

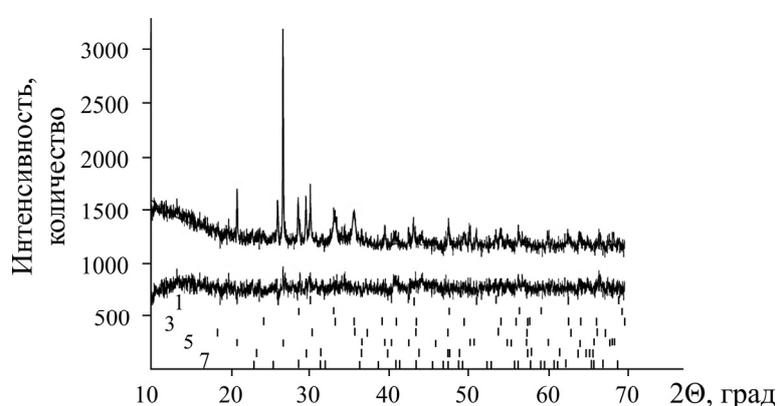


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ огарка, уточненный методом Ритвельда, %: 1 — галенит (3.81); 2 — сфалерит; 3 — гематит; 4 — магнетит (3.4); 5 — кварц (21.11); 6 — кальцит (5.06)

Для уточнения минерального состава новообразованных фаз проведено петрографо-минераграфическое изучение пробы немагнитной фракции огарка (рис. 5), который подтвердил окисление пирита и наличие в обожженном продукте наряду с реликтовыми сульфидными минералами свинца и цинка новообразованных фаз галенита, сфалерита и гематита. При анализе огарка пробу немагнитной фракции предварительно упаковывали в искусственный препарат путем цементации эпоксидной смолой и исследовали в отраженном свете.

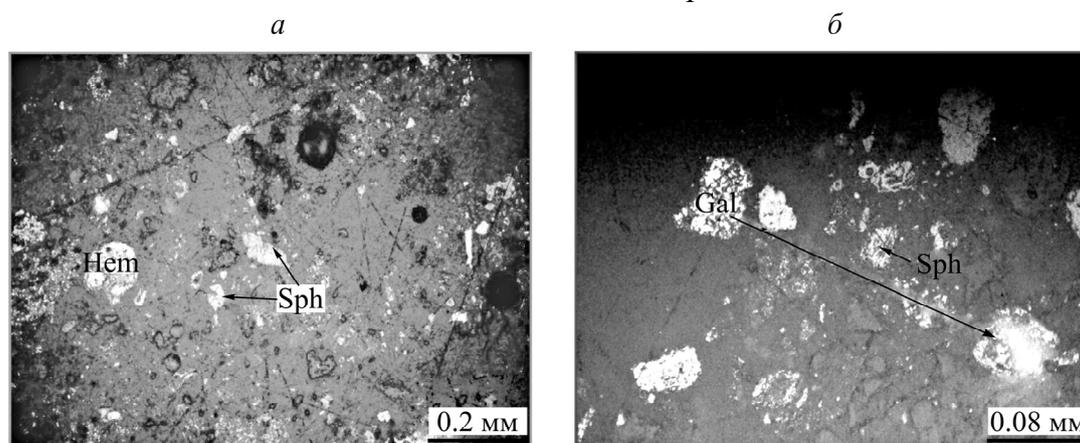
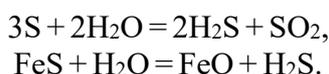


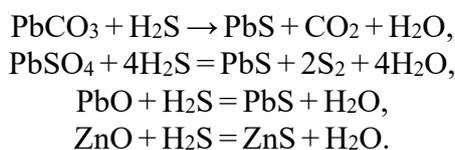
Рис. 5. Фото немагнитной фракции огарка: *a* — зерна новообразованного сфалерита (Sph) и гематита (Hem) округлой формы; *б* — морфология выделений галенита (Gal) и сфалерита (Sph)

Механизм процесса сульфидирования окисленных форм свинца и цинка можно предположить следующим образом. Известно, что термическая диссоциация сульфида железа сопровождается выделением S^0 по реакции $FeS_2 \rightarrow FeS + 1/2S_2$.

В системе за счет разложения гетита и плюмбоярозита образуется паровая атмосфера. Этого количества водяного пара достаточно для реализации процесса образования сероводорода за счет протекания реакций с продуктами термического разложения пирита — элементарной серой и сульфидом железа:



Метастабильный оксид железа FeO в дальнейшем окисляется до Fe_2O_3 . Образующийся сероводород участвует в сульфидировании и церуссита (возможно, и продукта его разложения — PbO) и разложившихся труднообогатимых минералов (плюмбоярозита, гетеролита):



В полиметаллических рудах помимо основных минералов часто содержатся значительные количества благородных металлов (золото, серебро), которые ассоциируют с сульфидами железа [32–35]. Использование данного процесса при промышленном содержании благородных металлов позволит вскрыть тонкое и мелкое золото и попутно его извлечь при дальнейшей переработке хвостов обогащения.

ВЫВОДЫ

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что при совместном обжиге гетит- и плюмбоярозитсодержащей окисленной руды с труднообогатимой сульфидной рудой, характеризующейся тесным взаимным проращением тонкозернистых сульфидов Fe , Zn , Pb , происходит селективное окисление пирита, сопровождающееся дезинтеграцией взаимопросшихся сульфидов Pb , Zn , и пиросульфидирование окисленных минералов. По данным анализов огарков, в результате обжига при $650–700\text{ }^\circ\text{C}$ появляются новообразованные минералы — сфалерит (ZnS), галенит (PbS), магнетит (Fe_3O_4), гематит (Fe_2O_3), что позволяет отнести этот обожженный продукт к легкообогатимому флотацией свинцово-цинковому сырью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мигачев И. Ф., Карпенко И. А., Петраш Н. Г., Карпухина М. В., Куликов Д. А., Черемсин А. А. Оптимальное использование минерально-сырьевой базы месторождений свинца и цинка в Республике Бурятия // Руды и металлы. — 2007. — № 2. — С. 7–19.
2. Дугаржапова Д. Б. Минерально-сырьевой комплекс в экономике Республики Бурятия: состояние и перспективы // Вестн. БГУ. — 2021. — № 4. — С. 42–51.
3. Бахтин В. И., Яловик Г. А. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы Республики Бурятия до 2020 г. // Разведка и охрана недр. — 2007. — № 12. — С. 6–15.
4. Pashkevich M. A. and Petrova T. A. Technogenic impact of sulphide-containing wastes produced by ore mining and processing at the Ozernoe deposit: investigation and forecast, J. Ecological Eng., 2017, Vol. 18, Iss. 6. — P. 127–133.

5. **Нефедьев М. А.** Объемная модель и оценка перспектив Озернинского рудного узла по геофизическим данным (Западное Забайкалье). — Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. — 184 с.
6. **Гордиенко И. В.** Ресурсы стратегического минерального сырья Республики Бурятия: состояние и перспективы развития // *Науки о Земле и недропользование*. — 2020. — Т. 43. — № 1. — С. 8–35.
7. **Дистанов Э. Г., Ковалев К. Р.** Текстуры и структуры гидротермально-осадочных колчеданно-полиметаллических руд Озерного месторождения. — Новосибирск: Наука, 1975. — 72 с.
8. **Ковалев К. Р., Бусленко А. И.** Гидротермально-осадочный рудогенез и полиметаморфизм руд Озернинского рудного узла (Западное Забайкалье). — Новосибирск: Наука, 1992. — 214 с.
9. **Гордиенко И. В., Нефедьев М. А.** Курбино-Еравнинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения // *Геология рудных месторождений*. — 2015. — Т. 57. — № 2. — С. 114–124.
10. **Клименко Н. Г., Ахмедов А. З.** Пути эффективного использования окисленных полиметаллических руд // *Руды и металлы*. — 1996. — № 6. — С. 66–69.
11. **Caproni G., Ciccu R., and Trudu I.** The processing of oxidized lead and zinc ores in the campo pisano and san giovanni plants (Sardinia), Processing of oxidized and mixed oxide-sulphide lead-zinc ores, Polish Sci. Publ., 1979. — P. 69–91.
12. **Aryasuta Nayak, Jena M.S., et. al.** Beneficiation of lead-zinc ores — a review, Min. Proc. and Extractive Metallurgy Review, 2022, Vol. 43, No. 5. — P. 564–583.
13. **Wet J. R. and Singleton J. D.** Development of a viable process for the recovery of zinc from oxide ores, J. Southern African Institute Min. and Metall., 2008, Vol. 108. — P. 253–259.
14. **Liqun Luo, Xiaoxue Zhang, et al.** Comparing strategies for iron enrichment from Zn- and Pb-bearing refractory iron ore using reduction roasting-magnetic separation, Powder Technol., 2021, Vol. 393. — P. 333–341.
15. **Min Xiao-bo, Jiang Guang-hua, et. al.** Sulfidation roasting of zinc leaching residue with pyrite for recovery of zinc and iron, J. Cent. South Univ., 2020, Vol. 27. — P. 1186–1196.
16. **Yang B., Zha G. Z., et. al.** Sustainable extraction of lead and re-use of valuable metals from lead-rich secondary materials, J. Cleaner Production, 2019, Vol. 219. — P. 110–116.
17. **Lorenzo-Tallafigo J., Iglesias-González N., et. al.** An alternative approach to recover lead, silver and gold from black gossan (polymetallic ore), Study of biological oxidation and lead recovery stages, J. Cleaner Production, 2019, Vol. 207. — P. 510–521.
18. **Мютевеллиоглу Н. А., Екелер М.** Обогащение окисленных свинцово-цинковых руд путем флотации с использованием различных химикатов и условий испытаний // *ФТПРПИ*. — 2019. — № 2. — С. 162–168.
19. **Dong Z., Zhu Y., Han Y., Gu X., and Jiang K.** Study of pyrite oxidation with chlorine dioxide under mild conditions, Min. Eng., 2019, Vol. 133. — P. 106–114.
20. **Lukas Hoeber and Stefan Steinlechner.** A comprehensive review of processing strategies for iron precipitation residues from zinc hydrometallurgy, Cleaner Eng. and Technol., Vol. 4, No. 2021. 100214.
21. **Lan Zhuo-yue, Lai Zhen-ning, et. al.** Recovery of Zn, Pb, Fe and Si from a low-grade mining ore by sulfidation roasting-beneficiation-leaching processes, J. Cent. South Univ., 2020, Vol. 27, No. 1. — P. 37–51.
22. **Zheng Y., Liu W., and Qin W.** Sulfidation roasting of lead and zinc carbonate with sulphur by temperature gradient method, J. Cent. South Univ., 2015, Vol. 22, Iss. 5. — P. 1635–1642.
23. **Li Y., Wang J. K., Wei C., Liu C. X., Jiang J. B., and Wang F.** Sulfidation roasting of low grade lead-zinc oxide ore with elemental sulfur, Min. Eng., 2010, Vol. 23, Iss. 7. — P. 563–566.
24. **Junwei Han, Wei Liu, et. al.** Mechanism study on the sulfidation of ZnO with sulfur and iron oxide at high temperature, Scientific Reports, 2017, 7:42536.

25. Антропова И. Г., Дамбаева А. Ю., Данжеева Т. Ж. Применение сульфидизирующего обжига в атмосфере водяного пара в схемах обогащения окисленных свинецсодержащих руд // Обогащение руд. — 2016. — № 6. — С. 3–8.
26. Антропова И. Г., Дамбаева А. Ю. Метод сульфидирования труднообогатимых окисленных минералов свинца и цинка в атмосфере водяного пара // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 163–167.
27. Смайлов Б. Б. Разработка способа оценки обогатимости и моделирования флотационных систем переработки труднообогатимых свинцово-цинковых руд: дис. ... канд. техн. наук. — М.: ИПКОН РАН, 2019. — 182 с.
28. Lopez R., Jordao H., et al. Study of butyl-amine nanocrystal cellulose in the flotation of complex sulphide ores, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Eng. Aspects. 2019, Vol. 579, Article 123655.
29. Омарова Н. К., Шерембаева Р. Т., Имашев А. Флотация сульфидных свинцово-цинковых руд Акжалского месторождения // Обогащение руд. — 2022. — № 2. — С. 25–28.
30. Алгебраистова Н. К., Прокопьев И. В., Комарова Е. С. Подготовка коллективных свинцово-цинковых концентратов к циклу селекции // Цв. металлы. — 2021. — № 4. — С. 12–17.
31. Zhang P., Ou L., et al. MLA-based sphalerite flotation optimization: Two-stage roughing, Powder Technol., 2019, Vol. 343. — P. 586–594.
32. Александрова Т. Н., Хайде Г., Афанасова А. В. Оценка упорности золотосодержащих руд на основе интерпретации данных термического анализа // Зап. Горн. ин-та. — 2019. — Т. 235. — С. 30–37.
33. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогатимости сульфидных и окисленных руд золоторудных месторождений Алданского щита // Зап. Горн. ин-та. — 2020. — Т. 242. — С. 218–227.
34. Biondi J. C., Borgo A., et al. Structural, mineralogical, geochemical and geochronological constraints on ore genesis of the gold-only Tocantinzinho deposit (Para State, Brazil), Ore Geology Reviews, 2018, Vol. 102. — P. 154–194.
35. Мязин В. П., Литвинцева В. И. Изыскания новых селективных реагентов для повышения эффективности флотации свинцово-цинковых руд Ново-Широкинского месторождения // Вест. ЗабГУ. — 2017. — Т. 23. — № 2. — С. 4–15.

Поступила в редакцию 31/III 2023

После доработки 25/IV 2023

Принята к публикации 18/V 2023