

УДК 549.086; 622.7

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТРУДНООБОГАТИМЫХ СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ РУД

Н. Ф. Усманова^{2,1}, Е. А. Бурдакова^{1,2}, И. И. Бакшеева¹,
А. А. Плотникова¹, В. Н. Князев¹

¹Сибирский федеральный университет,
просп. Свободный, 79, 660041, Красноярск, Россия

²Институт химии и химической технологии СО РАН,
Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,

E-mail: usmanowa.natalia@yandex.ru, ул. Академгородок, 50 стр. 24, 660036, г. Красноярск, Россия

Представлены результаты исследований вещественного состава двух проб свинцово-цинковой руды одного из рудных тел Горевского месторождения. Пробы характеризуются как труднообогатимые вследствие тонкой вкрапленности галенита, его сложных сростаний со сфалеритом; отличаются частичным замещением сульфида свинца англезитом и церусситом; наличием колломорфных образований галенита. Выполнены рентгенофазовый, химический, гранулометрический анализы исходных проб руды с распределением целевых элементов по классам крупности. Результаты флотационных исследований проб руды месторождения по селективной схеме с варьированием крупности в питании свинцового цикла, изучением различных реагентных режимов и последующего электронно-микроскопического анализа продуктов флотации подтвердили ее технологическую упорность.

Труднообогатимая свинцово-цинковая руда, галенит, англезит, церуссит, сфалерит, тонкая вкрапленность, оптическая и электронная микроскопия, флотация

DOI: 10.15372/FTPRI20240116
EDN: YTBVZD

Увеличение добычи и переработки сульфидных руд цветных металлов в настоящее время происходит в основном за счет вовлечения в процесс технологически упорных руд со сложным вещественным составом, более тонкой вкрапленностью ценных компонентов. Отсутствие надежных данных по минералогическому составу сложных полиметаллических руд, характеру сростаний ценных компонентов может привести к значительным потерям целевых элементов при разработке технологии обогащения. Детальную информацию об исходном вещественном составе можно получить в случае применения современных методов анализа, включающих химические, оптические и электронно-микроскопические исследования. Такой подход представляет исчерпывающие сведения, с помощью которых потери ценных компонентов в технологическом процессе минимизируются.

Работа выполнена в рамках проекта Красноярского краевого фонда науки “Разработка и обоснование технологических решений для переработки труднообогатимых свинцово-цинковых руд Красноярского края”.

В результате совместного применения методов количественной рентгеновской дифракции (QXRD), автоматического минералогического анализа (MLA), оптической микроскопии и химического анализа при изучении образцов пяти различных месторождений Германии и Польши получена детальная информация об изучаемых объектах. Определен минералогический состав сложных руд с относительным отклонением в пределах 10 % по основным компонентам и микроэлементам [1]. Комплексные 2D-минералогические сведения, установленные с применением анализаторов QEMSCAN, EMPA, растровой электронной микроскопии, в сочетании с 3D-характеристиками частиц, изученными посредством рентгеновской компьютерной томографии, позволили объяснить влияние минералогических особенностей и примесей в исходной руде на скорость выщелачивания сфалерита из руды [2]. С помощью автоматизированного петрографического анализатора на стадии исследования образцов зерна окисленной свинцово-цинковой руды рассматривались целевые минералы и вредные примеси, которые могут осложнить дальнейшие процессы переработки [3].

Детальное изучение исходной руды и продуктов обогащения на современных автоматизированных минералогических микроскопах способствует формированию развернутых сведений о раскрытии ценных компонентов по стадиям измельчения [4, 5]; содержанию вредных примесей, влияющих на извлечение в концентраты по операциям обогащения, потери целевых компонентов с хвостами обогащения [6–11]; влиянии минералогических особенностей сульфидных минералов на их поведение в последующей пирометаллургии [12]. Современные методы сканирующей электронной и лазерной микроскопии применяются для изучения образования адсорбционного слоя реагентов на поверхности сульфидных минералов [13]. В этой связи синергия химических методов анализа с современными возможностями минералогической приборной базы позволяет решать сложные технологические задачи при переработке труднообогащаемых руд различного состава.

В настоящее время в переработку на Горевской обогатительной фабрике вовлекаются свинцово-цинковые руды нового рудного тела, характеризующиеся более тонкой вкрапленностью галенита и сфалерита, наличием окисленных форм минералов свинца. Существующий технологический режим на действующей фабрике не позволяет получать товарные концентраты с требуемым качеством по селективной схеме обогащения. Для решения возникающих проблем проведены детальные минералогические исследования исходного вещественного состава и продуктов обогащения, рассмотрены варианты применения комбинированной подачи реагентов собирателей, изменения крупности в питании межцикловой и основной свинцовой флотации.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследования проведены на исходных пробах свинцово-цинковой руды Горевского месторождения. Одна проба представляет материал месторождения верхних горизонтов до 50 м от дневной поверхности, другая — нижние горизонты 50–100 м. По результатам химического анализа в пробе верхних горизонтов содержание Pb составило 6.85 %, Zn — 5.44 %; в пробе нижних горизонтов — 3.44 и 6.19 % соответственно.

Текстурно-структурные особенности и минеральный состав исследованных проб изучались в проходящем и отраженном свете на оптических микроскопах Axioscope 40 и Olympus BX53 с увеличением от 2.5 до 100 крат. Изображение фиксировалось на высокоразрешающую цифровую камеру SIMAGIS (чувствительность матрицы 18 Мп). Электронно-микроскопический и энергодисперсионный анализ проводились на электронном микроскопе Tescan VEGA 3 SBH с приставкой Oxford X-Act (аналитики Б. М. Лобастов, С. А. Сильянов). Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов проб исходной руды и продуктов обогащения выполнен автоматизирован-

ным рентгеновским дифрактометром XRD-6000 фирмы Shimadzu. Полученные данные рассчитывались и расшифровывались по стандартной методике с использованием картотеки эталонных порошковых спектров JCPDS (аналитик А. С. Самойло). Содержание химических элементов Pb, Zn, Fe, S определялось волновым рентгенофлуоресцентным спектрометром XRF-1800 фирмы Shimadzu (аналитик А. И. Фертиков) по стандартной методике — полуколичественный анализ способом фундаментальных параметров средствами программного обеспечения поставщика оборудования. Внешний контроль проб на содержание основных элементов осуществляли атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связной плазмой. Содержание золота и серебра в исходных пробах устанавливалось атомно-абсорбционным методом.

В соответствии с методикой определения индекса измельчения для каждой из проб установлен индекс работы Бонда. Флотационные исследования проводились на лабораторных механических флотомашинах с объемом камер 3.0; 0.75; 0.5 л. Для оценки скорости флотации минералов свинца, цинка и породы осуществляли фракционный съем пены через заданный интервал времени. В рамках настоящей работы изучалось влияние на технологические показатели крупности в питании свинцового цикла, подачи депрессоров, введения дополнительного реагента собирателя в реагентный режим, воздействия среды pH, создаваемой известью и содой в цикле свинцовой флотации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Минералогический состав. Главными рудными минералами в исследованных пробах руды по результатам рентгенофазового анализа являются сфалерит, галенит, пирит. Содержание сульфида цинка в обеих пробах практически одинаково — в пределах 7 %. Массовая доля сульфида свинца выше в пробе верхних горизонтов и составляет 6.85 %, проба нижних горизонтов беднее на 3.41 %. Кроме сульфида свинца, в пробах присутствуют окисленные минералы свинца, представленные англезитом и церусситом, суммарное их содержание по пробам находится в пределах 1 %. Содержание пирита в пробах различается практически в 2 раза: в пробе верхних горизонтов 5.8 %, в пробе нижних горизонтов 10.3 %. В пробе верхних и нижних горизонтов месторождения на долю магнетита приходится соответственно 2.7 и 1.9 %. Второстепенные рудные минералы представлены пирротином, гидроокислами железа, арсенопиритом, суммарная доля их в пробах не превышает 1.5 %. Из пороодообразующих преобладают: сидерит — до 35 % в пробе верхних горизонтов, 33.2 % — в пробе нижних горизонтов; кварц — 32.5 и 34.5 % соответственно. Пробы различаются по содержанию мусковита и клинохлора. В пробе верхних горизонтов мусковит отсутствует, а в пробе нижних горизонтов его доля составляет 7.86 %. В то же время в пробе верхних горизонтов отмечается флогопит в пределах 3.5 %, а в пробе нижних горизонтов этот минерал не обнаружен. Клинохлор присутствует в обеих пробах, но в верхних горизонтах его доля выше и составляет 5.8 %, в нижних горизонтах — 1.22 % (таблица).

По результатам минералогического изучения свинец в рудном материале представлен галенитом, англезитом, церусситом. Характерная особенность галенита в исследуемом сырье — большое количество тонких (менее 10 мкм) свободных идиоморфных зерен. Редкие, относительно крупные сростки зерен галенита не превышают по размеру 0.6–0.8 мм. В сростках галенит представлен в основном с рудными минералами — сфалеритом и пиритом, реже с арсенопиритом, пирротином и пороодообразующими минералами — сидеритом и кварцем (рис. 1а–г). Для галенита характерна неравномерная вкрапленность: отмечаются небольшие по размеру “островки”, “линзы”, богатые галенитом, и участки, где его содержание мало.

Минеральный состав проб (РФА, масс. %)

Минерал	Проба горизонтов	
	верхних	нижних
Кварц	32.60	34.60
Пирит	5.81	10.30
Мусковит	—	7.86
Сфалерит	7.31	7.06
Сидерит	35.00	33.2
Галенит	6.00	2.15
Клинохлор	5.80	1.22
Пирротин	0.27	0.41
Церуссит	0.47	0.44
Англезит	0.41	0.69
Флогопит	3.51	—
Магнетит	2.70	1.92

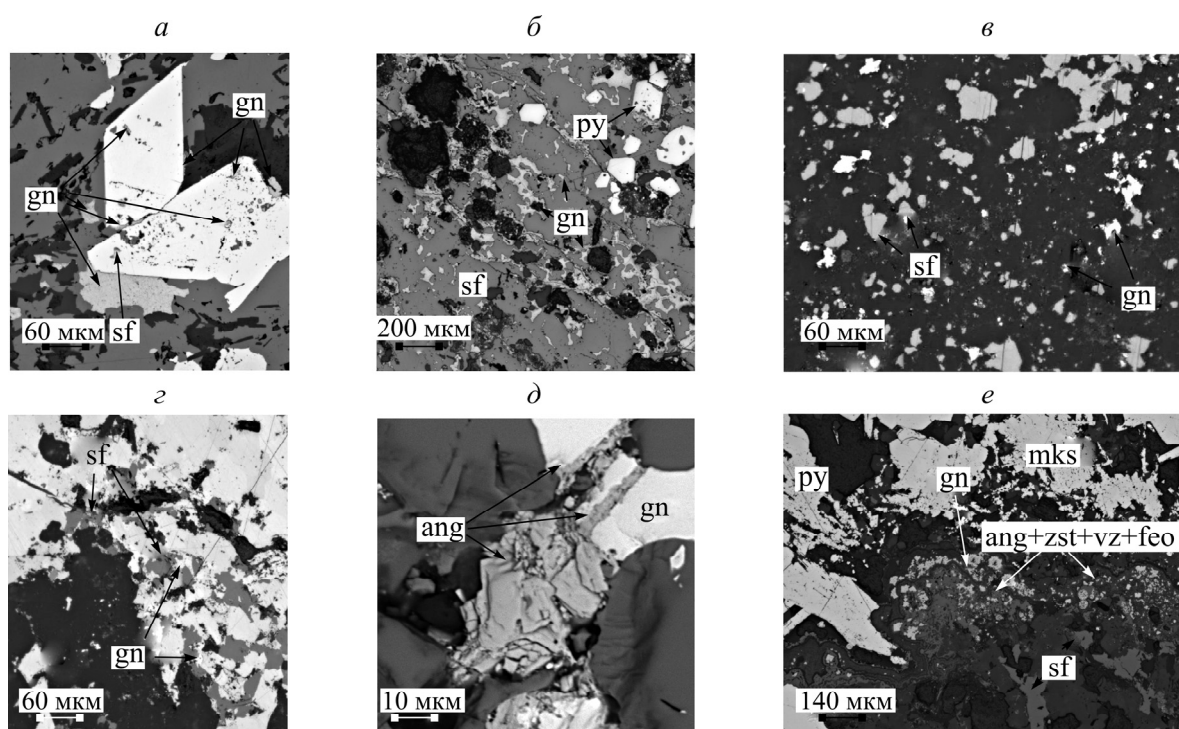


Рис. 1. Формы срастания минералов свинца в исходных пробах руды: *a* — срастание галенита (gn) с арсенопиритом (таблитчатая форма) и пиритом, тонкие (менее 5 мкм) включения галенита и сфалерита (sf) в пирите; *б* — сплошной агрегат сфалерита с вкрапленностью пирита (py), прожилками галенита; *в* — тонкий галенит в кварце и его срастания со сфалеритом; *г* — галенит и сфалерит в пирротине; *д* — англезит (ang) замещает галенит; *е* — англезит и церуссит (ang + zst) замещают галенит, вюртцит (vz), гидроокислы железа (feo), коллоидные структуры, марказит (mks)

Еще одна особенность галенита — изменение его оптических свойств в отраженном свете. В исследованных пробах зерна галенита часто более “тусклые”, что говорит о проявленных гипергенных изменениях и преобразовании галенита в церуссит и англезит. Карбонаты свинца развиваются преимущественно по плоскостям спайности, по краям зерен в виде тон-

чайших пленок, толщина таких образований не превышает 10–20 мкм (рис. 1д). Кроме того, отмечается развитие ультрадисперсного галенита в пробах и колломорфных образованиях (рис. 1е).

Для сфалерита в исследуемых пробах руды характерны весьма сложные по морфологии агрегаты. Отмечаются как практически мономинеральные агрегаты, так и срастания с пиритом и галенитом, в единичных случаях — с арсенопиритом (рис. 2а–в). Часто галенит образует каймы вокруг сфалерита (рис. 2г). Размеры зерен сфалерита различны: в матрице карбонатного состава он представлен преимущественно вкрапленностью разной степени насыщенности с размерами зерен и их агрегатов до 0.02–0.05 мм. В отличие от галенита, сфалерит тонких зерен, менее 10 мкм, не образует.

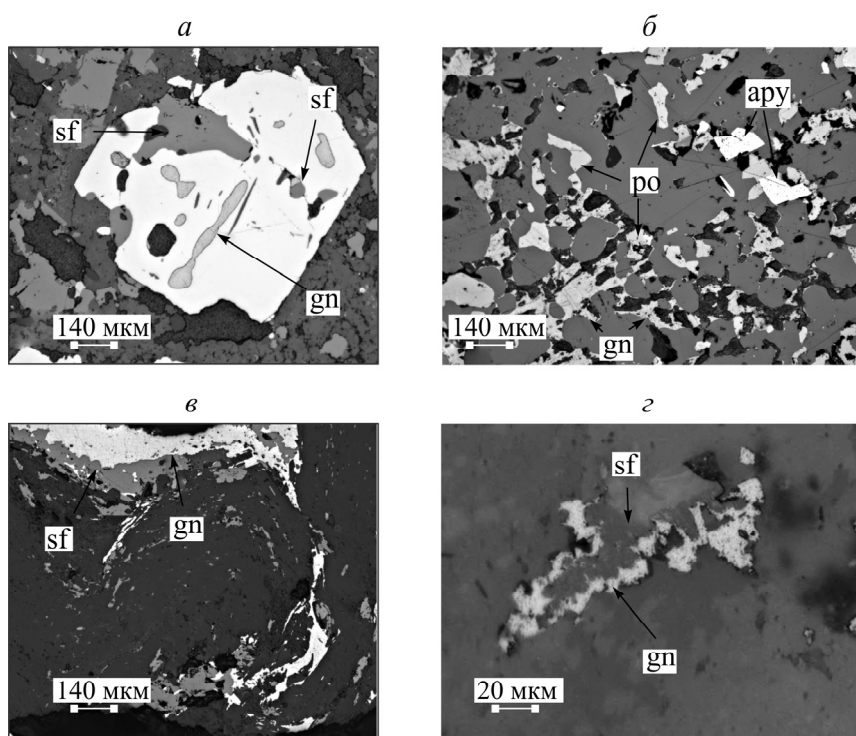


Рис. 2. Формы срастания сфалерита в исходных пробах руды: а — включения сфалерита (sf) и галенита (gn) в пирите; б — сфалерит с включениями галенита, пирротина (po), арсенопирита (apy); в — галенит-сфалеритовый прожилок в кварце, структура типа “снежный ком”; г — “об-растание” сфалерита галенитом

В исследуемых пробах руды пирит относится к основным сульфидным минералам, кото-рый развивается совместно с галенитом и сфалеритом. Он представлен идиоморфными зерна-ми размером до 0.1 мм и метазернами с раздробленными корродированными краями. Для пи-рита характерны пористость, включения порообразующих минералов. Встречается интен-сивное развитие марказита по пириту. Размер зерен пирита варьирует от микронных до 0.2 мм, глобулярного агрегата — менее 0.01 мм в поперечнике.

Химический состав. По содержанию оксидов кремния, алюминия, кальция, магния, мар-ганца, калия обе пробы практически идентичны. В пробе верхних горизонтов месторождения отмечается повышенное содержание Fe_2O_3 — 28.5% в сравнении с пробой нижних горизон-тов — 25.4%. Большая часть железа в пробах руды ассоциирована с окисленными формами минералов: 24.9 и 21.9% соответственно в пробе верхних и нижних горизонтов. Соотношение

целевых элементов Pb и Zn в пробе верхних горизонтов практически одинаково — 6.85 и 5.44 % соответственно. Проба нижних горизонтов по содержанию цинка богаче — 6.19 %, в сравнении со свинцом — 3.44 %.

По результатам полного химического анализа проб в качестве вредной примеси, которая может оказать негативное влияние на технологический процесс, отмечается наличие углерода в пределах 5 %. Из этого на долю органического углерода приходится не более 0.3 %. Доля мышьяка не превышает 0.03 %, сурьмы — 0.001 %. К полезному компоненту относится серебро: в пробе верхних горизонтов его содержание составило 26.9 г/т, нижних — 14.6 г/т; содержание золота в пробах — в пределах ошибки анализа, меньше 0.03 г/т.

Исследование содержания основных целевых элементов по классам крупности показало, что обе пробы характеризуются повышенным содержанием свинца в классах шламовой крупности. В пробе верхних горизонтов содержание Pb в исходной руде составило 6.85 %, а в классах $-0.044+0.020$ мм и $-0.020+0$ мм соответственно 14.0 и 15.1 % (рис. 3а). В целом проба нижних горизонтов беднее по свинцу — 3.37 %, но и здесь наиболее обогащены классы $-0.044+0.020$ мм и $-0.020+0$ мм соответственно 6.64 и 6.26 % (рис. 3б).

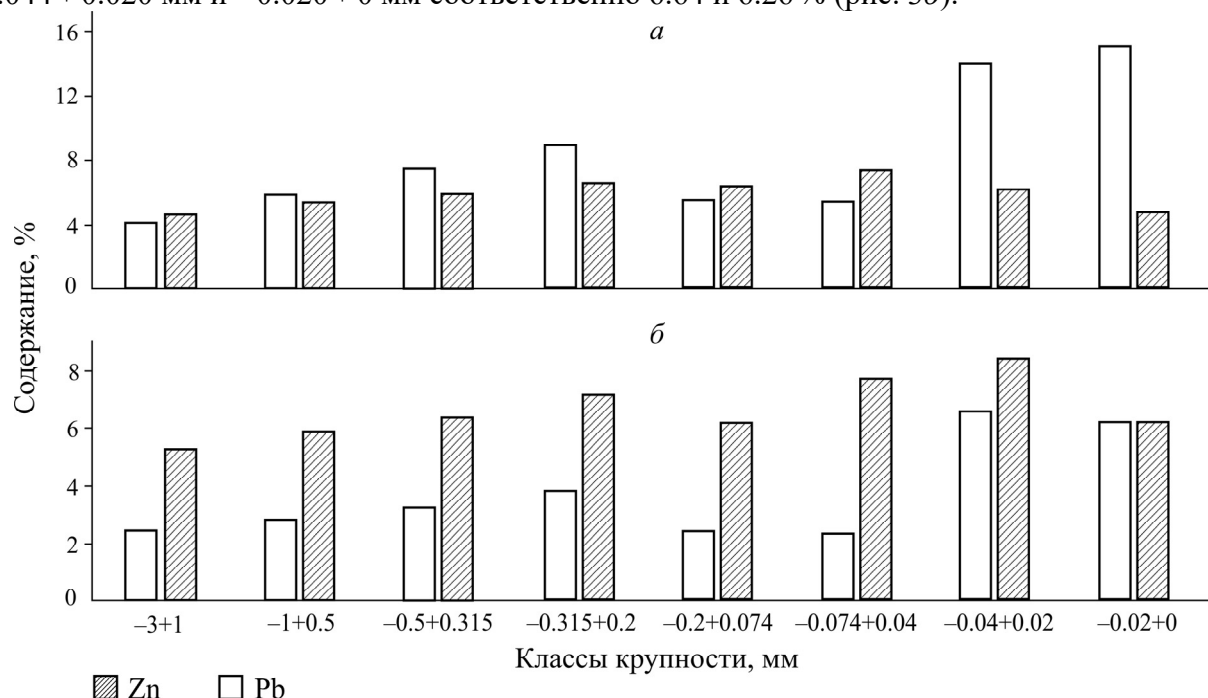


Рис. 3. Распределение свинца и цинка по классам крупности: а — проба верхних горизонтов месторождения; б — проба нижних горизонтов месторождения

По исходному содержанию Zn в руде обе пробы различаются незначительно — 5.44 и 6.19 % соответственно на верхних и нижних горизонтах месторождения. По анализируемым классам крупности цинк распределен относительно равномерно. В пробе верхних горизонтов отмечается небольшое увеличение его содержание в классе $-0.074+0.044$ мм до 7.35 % (рис. 3а). В пробе нижних горизонтов наблюдается повышение цинка в классе крупности $-0.315+0.200$ мм до 7.22 %; в классе $-0.074+0.044$ мм — до 7.74 %. Максимальное содержание цинка 8.43 % обнаружено в классе $-0.044+0.02$ мм (рис. 3б).

Результаты химического анализа и минералогических исследований коррелируют между собой и характеризуют руду как труднообогатимую вследствие сложных взаимоотношений основных целевых минералов, повышенного содержания ценных компонентов в классе крупности -44 мкм.

Технологические свойства руды. Основной объем исследований выполнен по селективной схеме, применяемой на действующей фабрике, с целью получения свинцового и цинкового концентратов с содержанием Pb и Zn не ниже 57 и 48 % соответственно. В случае применения фабричного реагентного режима на пробе верхних горизонтов в готовом свинцовом концентрате содержание Pb составило 11 %, Zn — 12.1 %; на пробе нижних горизонтов Pb — 5 %, Zn — 7.25 %. В дальнейших исследованиях для повышения технологических показателей в свинцовом цикле варьировалась крупность питания в межцикловой (65, 85 % класса – 0.074 мм) и свинцовой флотации (85, 95 % класса – 0.074 мм); выполнялись тесты с доизмельчением концентрата межцикловой флотации до 100 % класса – 0.044 мм и с проведением последующей перечистой операцией; изучались различные реагентные режимы с подачей депрессоров, комбинации собирателей — ксантогената и БТФ-152 для повышения качества и извлечения в готовый свинцовый концентрат. Исследовалось влияние pH среды, создаваемой известью и содой в цикле свинцовой флотации.

Варьировалось сочетание основного реагента собирателя и дополнительного по операциям в цикле свинцовой флотации в соотношениях 50:50; 70:30; 30:70. Оптимальные показатели по свинцовому концентрату получены при соотношении Кх:БТФ-152 — 30:70 с необходимым уровнем pH, создаваемым содой. Максимальное содержание Pb в свинцовом концентрате при этих условиях достигнуто 44.59 %, но содержание Zn составило 25.16 % (рис. 4). Извлечение свинца в концентрат не превышало 25 %.

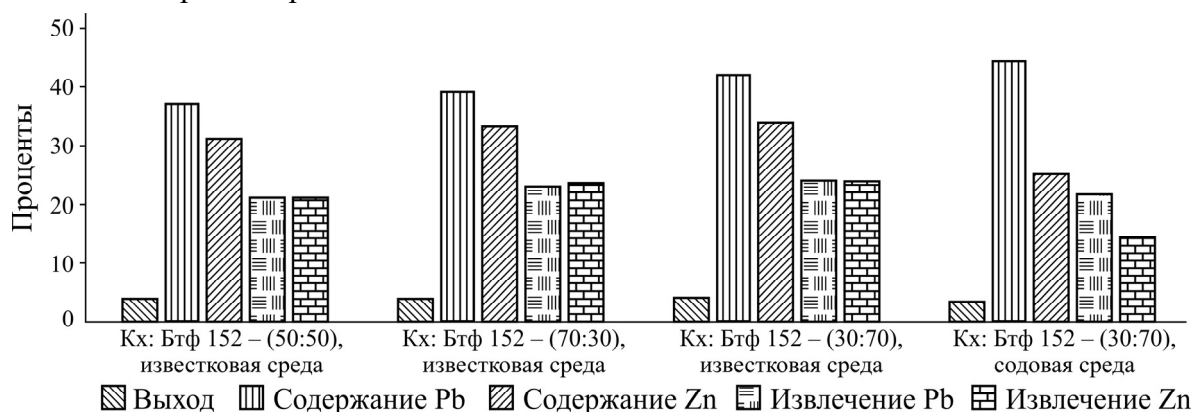


Рис. 4. Влияние сочетаний ксантогената и БТФ-152 на показатели свинцового концентрата

При предлагаемом реагентном режиме, с применением комбинации реагентов собирателей, содержание Zn в цинковом концентрате на пробе верхних горизонтов составило 25.86 %, на пробе нижних горизонтов — 47.7 %. Сфалерит в продуктах обогащения цинкового цикла в основном обнаруживается в свободной форме; тонких его частиц, характерных для галенита, не встречается.

В результате проведенных исследований не удалось получить кондиционный по содержанию свинца и цинка свинцовый концентрат. Детальный минералогический анализ продуктов флотации показал, что одной из основных причин повышенного содержания цинка в свинцовом концентрате является наличие сложных взаимоотношений галенита и сфалерита между собой и с железосодержащими минералами. В концентрате межцикловой флотации галенит характеризуется свободными частицами, чаще встречаются бинарные сростки галенита со сфалеритом, пиритом, где сульфид свинца “зажат” между частицами сульфида цинка или пирита. Кроме того, галенит представлен тонкими, ажурными каемками по периметру сфалерита, пирита, сидерита (рис. 5а, б). Размер свободных зерен галенита в исходных пробах руды

и в концентрате межциклового флотации (при разной тонине помола в питании) не превышает 10–15 мкм. В концентратных продуктах свинцового цикла крупность вростков галенита в других сульфидных минералах и минералах породы варьируется от 3–5 до 10 мкм.

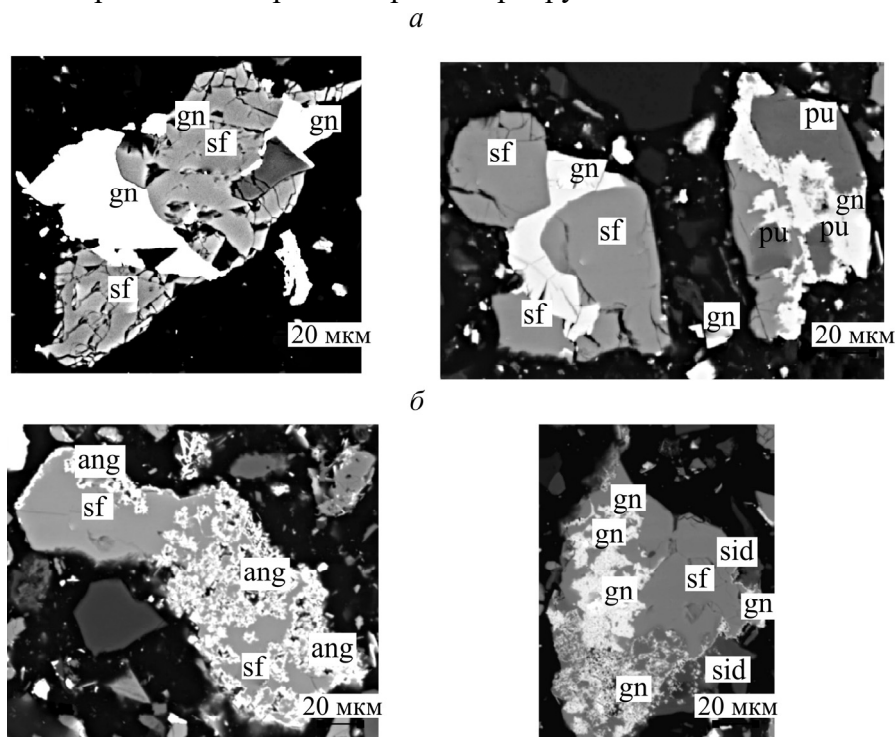


Рис. 5. BSE-фото сростков в продуктах цикла свинцовой флотации: *a* — типичные сростки галенита и сфалерита в концентрате межциклового флотации; *b* — типичные сростки в готовом свинцовом концентрате. Обозначения минералов см. на рис. 1; sid — сидерит

Выполнены тесты с доизмельчением концентрата межциклового флотации до 100 % класса –0.044 мм и последующей перечисткой. Результаты минералогических исследований показали, что в доизмельченном концентрате перечистки основная масса галенита приходится на бинарные сростки со сфалеритом, размер которых не превышает 20–25 мкм (рис. 6). Крупность свободных зерен галенита колеблется от 8–10 до 20 мкм. В хвостах перечистки доля галенита не превышает 3 %. Как и в концентрате, в хвостах перечистки сульфид свинца представлен в сростках со сфалеритом, а также встречаются сростки с сидеритом, пиритом, оксидами железа.

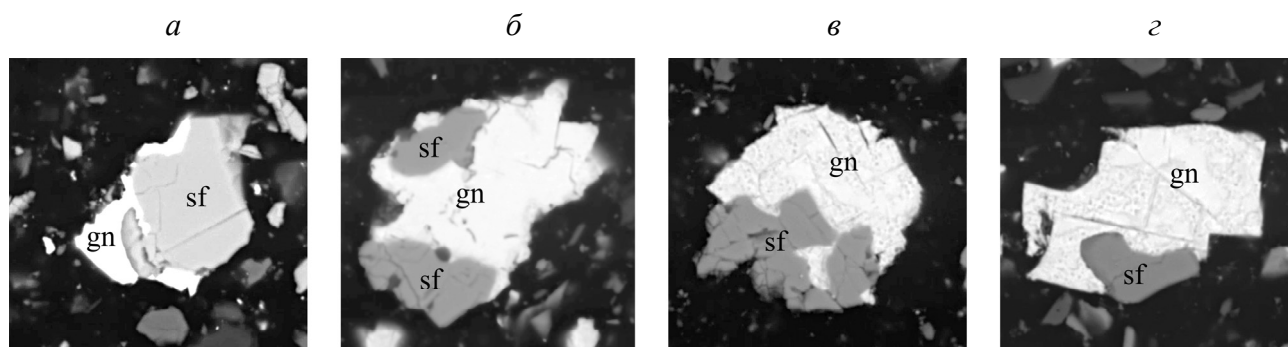


Рис. 6. BSE-фото концентрата межциклового флотации в крупности 100 % класса –0.044 мм (шкала 10 мкм): *a*, *b*, *в* — галенит в ассоциации со сфалеритом; *г* — сросток галенита и сфалерита

ВЫВОДЫ

Проведенный комплекс исследований обогатимости двух проб свинцово-цинковой руды одного из рудных тел Горевского месторождения показал их технологическую упорность в сравнении с перерабатываемыми в настоящее время рудами на фабрике. По результатам минералогического анализа исходных проб руды и продуктов обогащения с применением оптической и электронной микроскопии установлены следующие особенности: тонкая вкрапленность галенита до 8(10) мкм; частичное замещение сульфида свинца его окисленными формами — англезитом и церусситом; наличие колломорфных структур галенита, его сложных сростков со сфалеритом, минералами породы по селективной схеме, принятой на действующем предприятии, не позволяет получить требуемый по качеству свинцовый концентрат. Повышение содержания Pb в свинцовом концентрате до 45%, в сравнении со всеми изученными реагентными режимами, достигнуто за счет комбинированной подачи ксантогената и дополнительного реагента БТФ-152 в соотношении 30 : 70 при необходимой pH, создаваемой содой.

С учетом сложных тонких взаимных прорастаний целевых минералов друг с другом и с минералами породы в дальнейших исследованиях, наряду с применением комбинированной подачи реагентов-собирателей, рекомендуется изучить варианты тонкого измельчения концентратов свинцового цикла перед операциями перечистки для получения кондиционного свинцового концентрата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rahfeld A., Kleeberg R., Möckel R., and Gutzmer J.** Quantitative mineralogical analysis of European Kupferschiefer ore, *Miner. Eng.*, 2018, Vol. 115. — P. 21–23.
2. **Ghorbani Y., Becker M., Petersen J., Mainza A. N., and Franzidis J.-P.** Investigation of the effect of mineralogy as rate-limiting factors in large particle leaching, *Miner. Eng.*, 2013, Vol. 52. — P. 38–51.
3. **Santoro L., Boni M., Rollinson G. K., Mondillo N., Balassone G., and Clegg A. M.** Mineralogical characterization of the Hakkari nonsulfide Zn(Pb) deposit (Turkey): The benefits of QEMSCAN, *Miner. Eng.*, 2014, Vol. 69. — P. 29–39.
4. **Tiu G., Ghorbani Y., Jansson N., Wanhainen C., and Bolin N. J.** Ore mineral characteristics as rate-limiting factors in sphalerite flotation: Comparison of the mineral chemistry (iron and manganese content), grain size, and liberation, *Miner. Eng.*, 2022, Vol. 185. — 107705.
5. **Дениз Туран М., Балаз П.** Исследование свойств хвостов обогащения цинковой руды после механической активации в двух типах мельниц // ФТПРПИ. — 2020. — № 2. — С. 143–150.
6. **Buchmann M., Schach E., Tolosana-Delgado R., Leißner T., Astoveza J., Kern M., Möckel R., Ebert D., Rudolph M., Van den Boogaart K. G., and Peuker U. A.** Evaluation of magnetic separation efficiency on a Cassiterite-bearing Skarn ore by means of integrative SEM-based image and XRF–XRD data analysis, *Miner.*, 2018, Vol. 8, No. 9. — 390 p.
7. **Heinig T., Bachmann K., Tolosana-Delgado R., Van den Boogaart K. G., and Gutzmer J.** Monitoring gravitational and particle shape settling effects on MLA sample preparation, *Proc. IAMG Conf., Freiberg, Germany*, 2015. — P. 200–206.
8. **Kupka N., Tolosana-Delgado R., Schach E., Bachmann K., Heinig T., and Martin R.** R as an environment for data mining of process mineralogy data: A case study of an industrial rougher flotation bank, *Miner. Eng.*, 2020, Vol. 146. — 106111.
9. **Minz F. E., Bolin N.-J., Lamberg P., Bachmann K., Gutzmer J., and Wanhainen C.** Distribution of Sb minerals in the Cu and Zn flotation of Rockliden massive sulphide ore in north-central Sweden, *Miner. Eng.*, 2015, Vol. 82. — P. 125–135.

10. Dehaine Q., Tijsseling L. T., Glass H. J., Tormananen T., and Butcher A. R. Geometallurgy of cobalt ores: A review, *Miner. Eng.*, 2021, Vol. 160. — 106656.
11. Чантурия В. А., Миненко В. Г., Самусев А. Л., Копорулина Е. В., Рязанцева М. В. Извлечение циркония и редкоземельных элементов из растворов выщелачивания эвдиалитового концентрата // ФТПРПИ. — 2020. — № 4. — С. 138–148.
12. Горячев А. А., Беляевский А. Т., Макаров Д. В., Потапов С. С., Цветов Н. С. Переработка медно-никелевых руд посредством низкотемпературного обжига в смеси с сульфатом аммония // ФТПРПИ. — 2022. — № 3. — С. 116–125.
13. Матвеева Т. Н., Минаев В. А., Громова Н. К. Исследование характера закрепления комплексообразующих реагентов на поверхности рудных минералов методами оптической, сканирующей электронной и лазерной микроскопии // ФТПРПИ. — 2023. — № 4. — С. 168–175.

Поступила в редакцию 16/XI 2023

После доработки 25/XII 2023

Принята к публикации 24/I 2024