

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.765

О ВЛИЯНИИ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ХАРАКТЕРА ВЗАИМОСВЯЗИ МИНЕРАЛОВ НА ВЫБОР СПОСОБОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СВИНЕЦСОДЕРЖАЩИХ РУД

**В. А. Бочаров, В. А. Игнаткина, А. А. Каюмов,
А. Р. Макавецкас, Ю. Ю. Фищенко**

*Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",
E-mail: woda@mail.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

Исследовано влияние особенностей структурных характеристик и параметров взаимосвязи минералов на выбор способов разделения свинецсодержащих полиметаллических руд месторождений РФ. На основе изучения глубокого раскрытия минеральных ассоциаций при их разрушении в процессах дезинтеграции с использованием системы минералогического анализа MLA установлено количественное распределение минеральных комплексов по классам крупности. По полученным данным раскрытия минералов определены ряды минеральных ассоциаций измельченных проб рудного материала, характерных для полиметаллических руд ряда месторождений. Показано, что галенит в ассоциации с халькопиритом, блеклыми рудами, вторичными сульфидами меди, сфалеритом, пиритом, пустой породой находится в основном в тонкодисперсных сростках с блеклой рудой и в меньшей степени с другими сульфидными минералами. Полученные ряды ассоциаций минералов позволяют определить порядок раскрытия сростков и выделение готовых по крупности минералов в межцикловых операциях флотации в начале рудного цикла. В концентрат первичной рудной флотации выделяют: блеклые руды, вторичные сульфиды меди, ассоциации золота, галенит, корродированный пирит.

Минерал, структуры, ассоциации, сростание, разрушение, сростки, раскрытие, технология, селекция

DOI: 10.15372/FTPRPI20180513

Определение степени влияния структурных особенностей и характера взаимосвязи минералов на выбор схемы разрушения и разделения свинецсодержащих полиметаллических руд наиболее актуально для ряда месторождений Российской Федерации в регионах Сибири, Забайкалья, Урала. В качестве характерных объектов технологические исследования выполнены на пробах руд Степного, Талловского и других месторождений, которые являются сложным, упорным и труднообогатимым сырьем. Эффективность разрушения, раскрытия минеральных агрегатов зависит в основном от степени дефектности кристаллической решетки сульфидных минералов, образующих полиминеральные комплексы.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ (№ 17-05-00890).

В [1] рассматривается специфика неоднородности строения природного минерального вещества. Физико-химические свойства кристаллов зависят от структурных характеристик, их степени дефектности. Дефекты в кристаллической решетке минералов имеют различную величину, размерность, геометрию и другие физические параметры. Различают дефекты кристаллической решетки — структурные (точечные, линейные, поверхностные), химические, электронные. Совокупность дефектных свойств на всех масштабных уровнях минеральной системы в результате взаимодействия и взаимосвязи минеральных агрегатов обуславливает степень рационального разрушения при механическом воздействии на минеральные комплексы в процессе измельчения. При механическом разрушении неоднородной минеральной системы, каковой являются полиминеральные агрегаты, в них развиваются напряжения, изменяющие прочность и упругость. Макро- и микронапряжения влияют на текстурные и структурные параметры кристаллов и в целом на минеральный комплекс. Напряжения могут быть генетические и остаточные, которые возникают после физико-механических воздействий, при механическом, тепловом, электромагнитном, радиационном, химическом и других видах обработки. При каждом виде воздействий происходит изменение состава, строения и состояния минеральных агрегатов.

В настоящей работе изучено влияние механического разрушения минеральных комплексов полиметаллических руд после механического разрушения в мельнице. Технологическое значение результатов разрушения с изучением распределения ассоциации минералов по классам крупности проявляется в создании рациональных способов разделения минералов меди, свинца, цинка, пирита. Особенно сложным является получение качественных свинцовых и цинковых концентратов. В Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» изучены пробы руд Рубцовского, Степного и других месторождений, установлены основные технологические свойства минералов свинца, цинка, меди, пирита. Содержание металлов в изучаемых пробах близкие, но пробы различаются по минеральному и химическому составу. Содержание металлов в руде Рубцовского месторождения, %: Cu — 1.2; Pb — 2.38; Zn — 4.57; S — 10.55; в руде Степного месторождения, %: Cu — 0.88; Pb — 1.87; Zn — 5.23; S — 8.55. Минеральный состав пробы руды Степного месторождения, %:

Пирит	9.20
Халькопирит	1.86
Блеклые руды	0.20
Галенит	1.90
Сфалерит	7.21
Ковеллин, халькозин	0.13
Хризokolла	0.15
Англезит-церуссит	0.17
Плюмбоярозит	0.49
Силикаты	0.61
Породные минералы:	
кварц	54.00
карбонаты	4.40
гидроокислы	12.20
хлорит, каолинит, полевоы шпат	7.00
Другие	0.48
Итого	100.00

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подготовка рудного материала, лабораторные и технологические исследования проводились по классическим методикам [1–3]; минералогические исследования выполнены на минералогическом анализаторе MLA. Различия минерального состава проявляются в содержании вторичных и окисленных минералов меди, свинца и цинка, которых больше в руде Рубцовского в сравнении с рудой Степного месторождения [4].

Пирит в руде Степного месторождения имеет различные морфологические выделения в виде сплошных образований, агрегатов кубического строения размерами 50–250 мкм; сферические агрегаты кубического строения размерами 1–10 мкм, микроскопические вкрапления 1–5 мкм. Частицы пирита крупностью менее 10 мкм часто заключены в матрице халькопирита, имеются микровключения пирита в блеклых рудах и в халькопирите.

Сфалерит образует тесные сростания с халькопиритом, галенитом, блеклыми рудами и пиритом с размерами выделений до 35 мкм. Мономинеральный сфалерит практически полностью отсутствует, халькопирит в сфалерите находится в виде микровключений, образований распада твердых растворов и в виде крупных частиц до 30–150 мкм пластинчатой формы. Пластинчатый халькопирит можно выделить в самостоятельный продукт; микровключения халькопирита из сфалерита обогатительными способами извлечь невозможно, что предполагает необходимость доводки черновых цинковых концентратов с использованием более энергозатратных воздействий.

Сростки сфалерита с галенитом и блеклыми рудами в ряде случаев можно селективно разделить флотацией, так как они развиваются вдоль трещин в сфалеритовых зернах в виде кристаллов пластинчатых форм с размерами зерен более 20 мкм (50–150 мкм). Химический состав сфалерита близок к теоретическому, с содержанием железа 0.32–1.72 %. Халькопирит имеет крупнозернистые выделения крупностью 0.25–1.5 мм в сростках с пиритом, галенитом, блеклой рудой и сфалеритом. Беспримесный вюрцит часто эмульсионно вкраплен в халькопирит с размерами зерен 1–3 мкм; по трещинам халькопирита развиваются вторичные сульфиды меди и породные минералы. Галенит находится в сростках с халькопиритом, сфалеритом, блеклыми рудами и пирротином. Часто галенит образует включения в сфалерите, а также в виде эмульсионных и реже изоморфных форм.

Блеклые руды находятся в сростках с халькопиритом, сфалеритом, галенитом и пиритом, самостоятельные образования мономинералов блеклых руд отсутствуют. В них имеются примеси цинка до 9.3 %, серебра и золота до 4.0 %. Блеклые руды соответствуют ряду теннантит-тетраэдрит с содержанием меди до 42.6 % и мышьяка до 16.9 %, сурьмы до 17.0 %. Отмечено тесное сростание галенита со сфалеритом. Эмульсионная вкрапленность халькопирита, блеклой руды, галенита в матрице сфалерита снижает качество цинкового концентрата. Смитсонит и англезит встречаются в единичных зернах в сростках с ковеллином и халькозином (смитсонит), а также со сфалеритом, галенитом, халькопиритом (англезит).

В пробах отмечены содержания сульфидов серебра и кадмия; в пробах руд, измельченных до крупности $-2+0$ мм, распределение минералов по классам различается незначительно. Содержание класса крупности -0.074 мм в руде Степного месторождения на 5 % больше в сравнении с рудой Рубцовского месторождения. Проба руды Рубцовского месторождения имеет более высокие показатели по измельчаемости в сравнении с пробой руды Степного месторождения, что можно объяснить большим содержанием окисленных и вторичных минералов меди, свинца и цинка. Распределение минералов по классам крупности неодинаково. В пробе руды Степного месторождения при продолжительности измельчения 25 мин свинец распределяется

в классе -0.044 мм в количестве 74 %, медь 79.7, цинк 77.4 %, что выше в сравнении с рудой Рубцовского месторождения. При продолжительности измельчения 25 мин пробы руды Степного месторождения выход класса -0.074 мм составляет 79 %, а класса -0.044 мм — 60 %; в руде Рубцовского месторождения показатели выше и равны 92 и 82 % соответственно; разница по классу -0.074 мм — 13 %, по классу -0.044 мм — 22 %. Доли сфалерита и галенита в пробах сопоставимы, а доля сульфидов меди в рудах Степного месторождения в тонких классах крупности достигает 57.5 %, что предопределяет необходимость его выделения в межцикловых операциях флотации. Разница в показателях измельчения проб обоих типов руд создает проблемы в выборе оптимального соотношения долей в шихте при совместной флотации.

Изучены условия раскрытия минералов в зависимости от продолжительности измельчения проб руд Степного и Рубцовского месторождений. На рис. 1 приведены зависимости степени раскрытия минералов по классам крупности. С уменьшением крупности возрастает доля свободных зерен за счет снижения доли бинарных и полиминеральных сростков сульфидов. Сростки, содержащие сульфатную и силикатную медь, в классе $-0.074 + 0.044$ мм в пробе руды Степного месторождения отсутствуют; в классах $+0.074$ и -0.044 мм минеральные фазы преобладают в свободном виде. В пробе руды Рубцовского месторождения в шламовых классах сульфатная и силикатная медь раскрыта, а в крупных классах преобладают бинарные сростки.

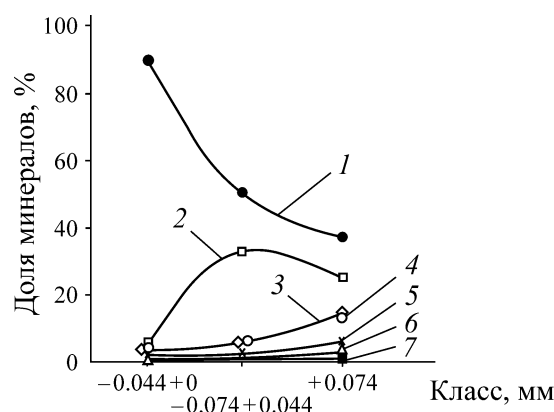


Рис. 1. Минеральные ассоциации халькопирита в классах крупности руд Степного месторождения: 1 — свободные зерна; бинарные сростки: 2 — ZnS; 3 — PbS; 4 — FeS₂; 5 — породные минералы; 6 — Cu₂S; 7 — блеклые руды

Смитсонит в пробах Степного и Рубцовского месторождений в шламовых классах крупности находится в основном в свободных зернах, а в крупных классах — в бинарных и полиминеральных сростках. Церуссит в пробе руды Степного месторождения не раскрыт во всех классах, преобладают полиминеральные сростки в отличие от руды Рубцовского месторождения, в которых имеются бинарные и полиминеральные сростки. Блеклые руды в пробе Степного месторождения в крупных классах находятся в сростках с халькопиритом, сфалеритом, пиритом и породными минералами, а в руде Рубцовского — с галенитом; в тонких классах преобладают сростки со сфалеритом, галенитом, вторичными сульфидами меди; в пробе Рубцовского месторождения этих сростков меньше в 2 раза. Сфалерит в руде Степного месторождения в крупных классах образует сростки с халькопиритом, галенитом и породными минералами, в пробе Рубцовского месторождения доля этих сростков существенно меньше. В шламовых классах обеих проб присутствуют свободные зерна сфалерита, незначительная его часть находится в сростках с породными минералами.

Галенит Степного месторождения в крупных классах образует сростки с халькопиритом, сфалеритом, пиритом и породными минералами; в пробе Рубцовского месторождения доля сростков меньше. В тонких классах пробы Степного месторождения доля сростков со сфалеритом более значительная. В пробах Степного и Рубцовского месторождений доля закрытых и полужакрытых сростков в крупных классах высокая, но в тонких классах доля открытых и частично открытых сростков равна 98–99 %, что является благоприятным фактором для селективной флотации минералов. В раскрытых сростках, содержащих сфалерит, доля в самых тонких классах невысокая, но, тем не менее, распределение свободных зерен минералов в шламовые классы в руде Степного месторождения составляет 78.97 %, а в руде Рубцовского месторождения — 62.97 %.

Раскрытие сростков минералов с галенитом в классе $-0.074 + 0.044$ мм с распределением в них свободных частиц в руде Степного месторождения равно 52 %, в руде Рубцовского месторождения — 59.64 %. Исследование смеси проб Степного и Рубцовского месторождений при разном соотношении показало, что в шихте 3 : 1 и 2 : 1 показатели ухудшаются с уменьшением доли руды Степного месторождения.

Показано, что распределение цинка, свинца во всех классах крупности сопоставимое в обеих пробах. В Рубцовской пробе с уменьшением крупности материала возрастает доля меди в виде минералов блеклых руд и вторичных сульфидов меди. Распределение бинарных и полиминеральных сростков, а также свободных частиц халькопирита в пробе 1 (33 % Рубцовской руды в шихте), в пробе 2 (25 % Рубцовской руды в шихте) неодинаково. С уменьшением крупности материала доля свободных зерен халькопирита увеличивается, раскрытие сростков возрастает и достигает максимума в шламовых классах 85–87 %.

В бинарных сростках халькопирит ассоциируется в сфалерите, пирите и в породных минералах. При этом с уменьшением крупности материала доля свободных зерен сфалерита значительно увеличивается в пробе 1 с 61.67 до 90.28 %, в пробе 2 с 64.60 до 86.60 %. Галенит в сростках распределяется в зависимости от долей типов руд неодинаково. В классах крупности $+0.044$ мм (проба 1) доля свободных зерен галенита составляет 53.82 %, в пробе 2 — 37.20 %. В шламовых классах в пробе 1 доля свободных частиц меньше, чем в пробе 2, т. е. 81.52 и 91.67 % соответственно. Галенит в сростках ассоциируется в основном со сфалеритом и пиритом.

Таким образом, особенности раскрытия сульфидов и пиритных полиметаллических и медно-цинковых руд сопоставимы [5–12]. С уменьшением крупности материала доля свободных частиц увеличивается, при этом в шламовых классах (проба 1) распределение долей халькопирита — 79.96, сфалерита — 85.00 %, в пробе 2 — халькопирита 74.55, сфалерита — 84.66 %. Галенит в пробе 1 преобладает в бинарных сростках, в пробе 2 — в сростках и в свободных зернах, в шламовых классах с уменьшением крупности материала возрастает доля свободных зерен в пробе 2 и составляет 80.69 и 89.98 % соответственно.

Неравномерное распределение минералов в руде Рубцовского месторождения не позволяет четко определить оптимальное соотношение долей руд Степного и Рубцовского месторождений с целью достижения более высоких показателей селективной флотации руд в шихте. Максимальное раскрытие в пробах 1 и 2 наблюдается в тонких и шламовых классах крупности. Основным выводом из анализа раскрытия сростков минеральных ассоциаций в рудах Степного и Рубцовского месторождений при измельчении указывает на неодинаковую степень раскрытия. Показатели образования готового класса крупности -0.074 мм для руд Степного месторождения — 80 %, для Рубцовского — 90 %, при этом на халькопирит приходится 94.98–97.61 и 81.20–89.30 % всей меди соответственно.

Сростки сульфатов и силикатов меди в руде Степного месторождения в крупных классах отсутствуют; бинарные сростки преобладают в Рубцовской пробе руды. В тонких классах минералы меди в руде Степного месторождения находятся в свободном виде, в руде Рубцовского месторождения сульфаты и силикаты меди полностью раскрыты. В руде Степного месторождения блеклые руды в крупных классах образуют сростки с халькопиритом, сфалеритом, пиритом и породными минералами, а в руде Рубцовского месторождения имеются еще сростки с галенитом.

Галенит в руде Степного месторождения в крупных классах образует сростки с халькопиритом, сфалеритом, пиритом, породными минералами, а в руде Рубцовского месторождения основная доля сростков галенита приходится на породные минералы и минералы группы блеклых руд. Галенит раскрывается с распределением доли свободных частиц в классах крупности $-0.074 + 0.044$ мм на 52 %, в руде Рубцовского — на 60 %. В Рубцовской пробе в отличие от пробы Степного месторождения имеется церуссит, который в основном распределяется в класс $+0.044$ мм.

Сфалерит в рудах Рубцовского месторождения представлен двумя разновидностями — в виде клеофана и с эмульсионной вкрапленностью в нем халькопирита. Сфалерит не раскрывается полностью даже в шламовых классах. В руде Степного месторождения доля свободного сфалерита составляет более 78,9, а в Рубцовской пробе — около 65,0 %.

При измельчении шихты Степного и Рубцовского (проба 1, 2 : 1) месторождений при крупности 78,3 % класс -0.074 мм и (проба 2, 3 : 1) 72,4 % отмечены различия в распределении меди. С уменьшением крупности материала возрастает доля меди в пробе 1 (2 : 1) в виде блеклых руд, в (пробе 2) 3 : 1 — доля вторичных сульфидов меди. В пробе 1 в классе $+0.074$ мм галенита в закрытых сростках больше, чем в пробе 2. В шламовых классах в пробе 1 галенит встречается на 80,9 % в свободном виде, а в пробе 2 — на 90 %. Сфалерит в основном находится в сростках с халькопиритом, доля свободного сфалерита возрастает с уменьшением крупности материала в пробах 1 и 2 с 61 до 90 % и с 64 до 86 % соответственно.

Приведенные в научной периодике результаты показывают зависимость разделения минералов от степени раскрытия, флотоактивности и параметров окисленности [13–17]. На рис. 2–4 представлены результаты распределения ассоциаций минералов по классам крупности.

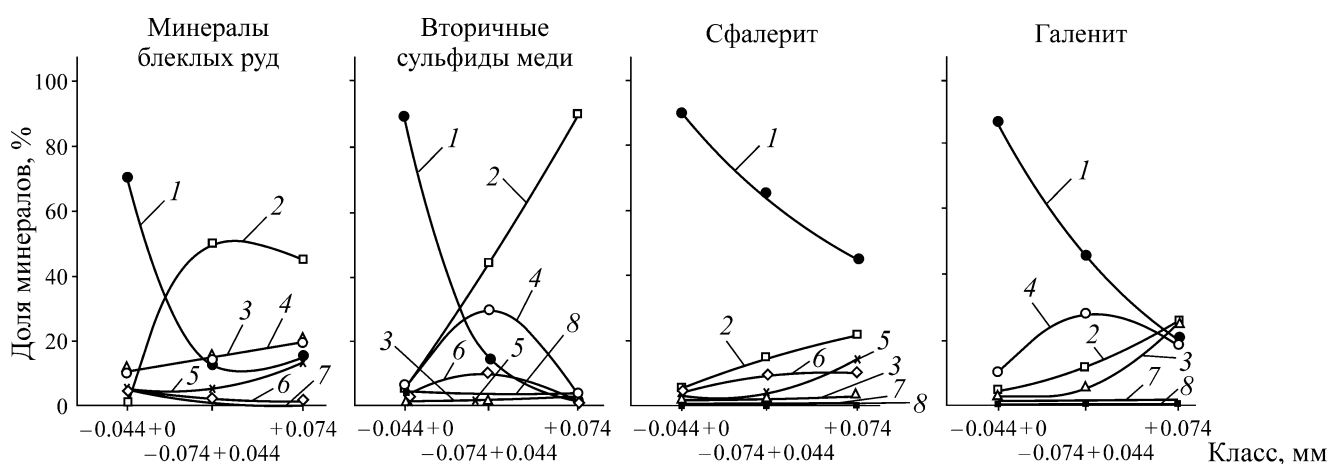


Рис. 2. Минеральные ассоциации блеклых руд, вторичных сульфидов меди, сфалерита и галенита в классах крупности руд Степного месторождения: 1 — свободные зерна; бинарные сростки: 2 + CuFeS_2 ; 3 + FeS_2 ; 4 + ZnS ; 5 + породные минералы; 6 + PbS ; 7 + Cu_2S ; 8 + минералы блеклых руд

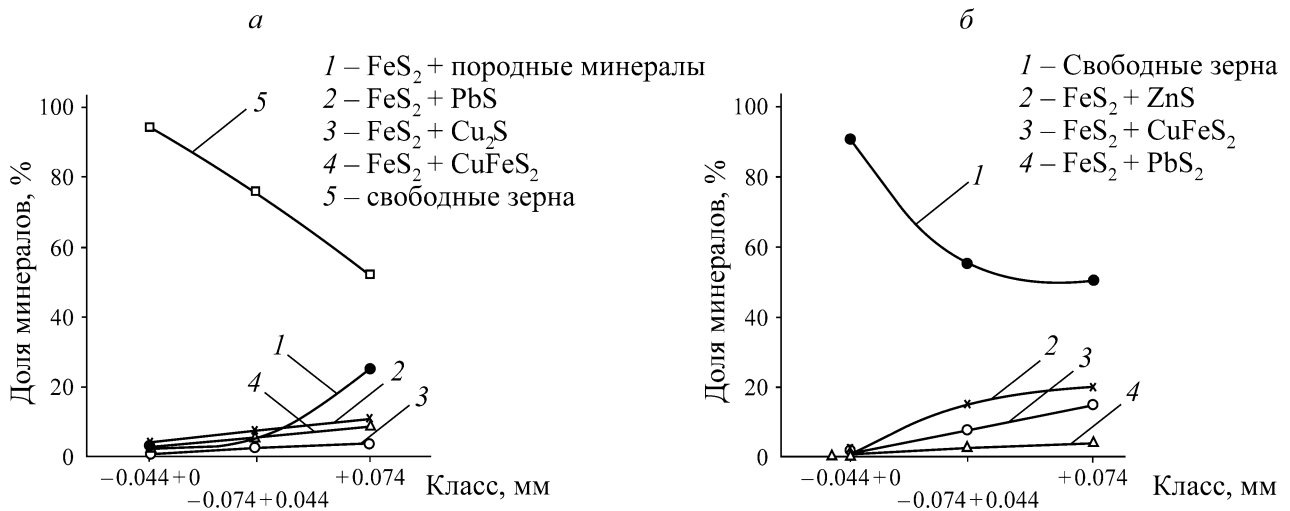


Рис. 3. Минеральные ассоциации пирита в классах крупности руд Степного (а) и Рубцовского (б) месторождений

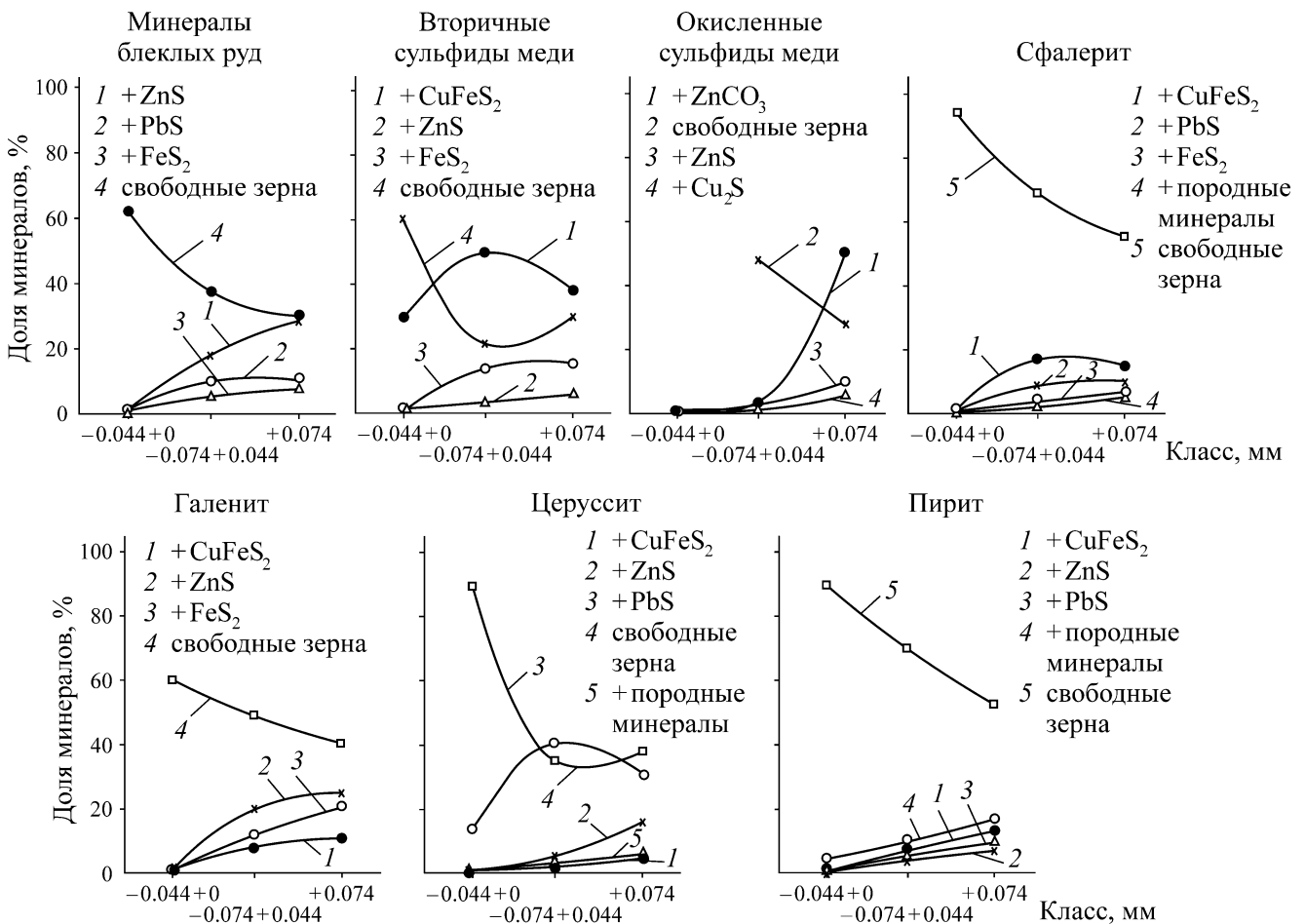


Рис. 4. Свободные зерна и бинарные сростки в классах крупности руд Рубцовского месторождения

Из представленных результатов минералогического и технологических исследований пробы руды Степного месторождения следует отметить, что доля распределения основного количества меди приходится на халькопирит, но в классе -0.044 мм возрастает доля вторичных сульфидов меди; сульфатная и силикатная медь преобладают в классах крупности $+0.074$ и

–0.044 мм в свободном виде, хотя абсолютное их содержание незначительно; во флотационном классе крупности –0.074 + 0.044 мм они практически отсутствуют. Блеклые руды присутствуют в крупных классах, где образуют сростки с халькопиритом, сфалеритом, пиритом и породными минералами. По трещинам халькопирита развиваются зерна вторичных сульфидов и породных минералов. Халькопирит часто вкраплен в сфалерит с крупностью 1 – 3 мкм. Галенит образует в крупных классах крупные сростки с халькопиритом, сфалеритом, пиритом и породными минералами. Раскрытие сростков с галенитом отмечается в классе –0.071 + 0.044 мм с распределением в них более 50.5 % свинца.

Характерны тесные связи галенита со сфалеритом и пиритом в классе крупности +0.074 мм, значительная доля галенита раскрывается в закрытых сростках. В шламовые классы свободные зерна галенита распределяются на 80 – 90 %. Раскрытие сростков со сфалеритом не происходит даже в тонких классах –0.044 мм; доля свободных зерен составляет 78 %. Характерны сростки сфалерита с породными минералами, отмечается эмульсионная вкрапленность минералов блеклых руд в галените, что предопределяет трудности в получении качественных цинковых и свинцовых концентратов.

Минералогическими исследованиями с использованием системы MLA установлены ряды распределения количественных ассоциаций минералов в сростках; для руд Степного месторождения (рис. 1 – 3а), которые сопоставимы с данными других авторов [10 – 21]:

- для халькопирита: $ZnS > PbS \geq FeS_2 >$ породные минералы $> CuS \geq$ блеклые руды;
- для блеклых руд: $CuFeS_2 > FeS_2 \geq ZnS >$ породные минералы $> PbS \geq CuS$;
- для вторичных минералов меди: $CuFeS_2 > PbS >$ породные минералы $> FeS_2 > CuS \geq$ блеклые руды;
- для сфалерита: $CuFeS_2 > PbS \geq$ породные минералы $> FeS_2 > CuS \geq$ блеклые руды;
- для галенита: $ZnS > CuFeS_2 > CuS >$ блеклые руды $> FeS_2 >$ породные минералы;
- для пирита: породные минералы $> PbS > CuFeS_2 \geq CuS > ZnS >$ блеклые руды.

Для руд Рубцовского месторождения уставлены ряды распределения ассоциаций минералов (рис. 3б, 4):

- для халькопирита: $ZnS > FeS_2 > PbS \geq$ породные минералы $>$ блеклые руды;
- для блеклых руд: $ZnS > PbS > FeS_2 > CuFeS_2 > CuS$;
- для вторичных минералов меди: $CuFeS_2 > FeS_2 > ZnS > PbS >$ породные минералы;
- для сфалерита: $CuFeS_2 > PbS > FeS_2 >$ породные минералы $>$ блеклые руды;
- для галенита: $ZnS > FeS_2 > CuFeS_2 >$ породные минералы $>$ блеклые руды;
- для церуссита: $PbS > ZnS >$ породные минералы $> CuFeS_2 > PbS > FeS_2$;
- для пирита: породные минералы $> CuFeS_2 > PbS > ZnS >$ блеклые руды;
- для сульфатов: $ZnSO_4 > ZnS > CuS > PbS >$ породные минералы.

Сложный характер минеральных ассоциаций в сростках, являющийся следствием генезиса [3, 5, 22, 23], предопределил применение схем многостадийного измельчения и межцикловых операций флотации для селективного выделения готовых фракций минералов по крупности и флотационной активности.

Близкие по составу полиметаллические руды Талловского месторождения, примыкающие к Степному месторождению, относятся к сплошным массивным, вкрапленным и прожилково-вкрапленным. Соотношение меди, свинца и цинка в руде 2 : 3 : 6, достаточно богатые по содержанию суммы всех металлов до 20 %. Главные рудообразующие минералы — халькопирит, галенит и сфалерит. Степень окисления руд ниже, чем в рудах Степного месторождения (3 – 7 %). По текстурно-структурным характеристикам руды представлены пятнистыми, полосчатыми, брекчиевыми, гнездовыми формами. Структура руд разнокристаллическая, коррозионная, ске-

летная, реликтовая, пятнистая, в форме замещенная, в виде отложения распада твердых растворов. По минеральному составу руды более однородные, чем руды Степного месторождения, но количественное содержание и колебания минералов значительные (по сфалериту до 50, галениту до 20, пириту до 8, нерудным минералам до 80 %). В рудах более развиты тонкозернистые структуры с эмульсионной взаимной вкрапленностью халькопирита и галенита; сфалерит часто сцементирован другими сульфидами, образуя тонкие сростки с галенитом, пиритом, халькопиритом. Степень раскрытия минералов неравномерная и медленная. В классах крупности -0.044 мм халькопирит раскрыт на 85, галенит — 82, сфалерит — 72 %, в классе -0.074 мм — 65–85, 70–80, 62–72 % соответственно. Остальная часть сульфидов находится в полиминеральных сростках. Пирит раскрывается раньше других минералов на 92–99 %. В связи с последовательной неодинаковой степенью раскрытия минералов схема измельчения и флотации учитывает широкое использование элементов многостадийности измельчения с межцикловыми операциями флотации. Разработанная коллективно-селективная схема флотации реализована на действующей Рубцовской обогатительной фабрике. В качестве депрессора сфалерита и пирита в медно-свинцовой флотации применяют сульфит натрия и цинковый купорос в известково-содовой среде [24, 25]. Разделение медно-свинцового концентрата проводится при депрессии галенита сульфитом натрия и железным купоросом при pH 5.2–5.5 с серной кислотой; черновой свинцовый концентрат (камерный продукт) переочищается в известковой среде при pH 11–12 с цинковым купоросом. Получены концентраты: медный — с содержанием меди 22.34 % при извлечении 77.16 %, свинцовый — с содержанием свинца 75.64 % при извлечении 73.94 %, цинковый — с содержанием цинка 52.73 % при извлечении 75.13 %.

В полиметаллических рудах уменьшение крупности зерен и неравномерная вкрапленность минералов сближает флотационные свойства сульфидов. В классах $-3+0.1$ мм минералы распределяются пропорционально их выходу, а в мелких классах при крупности -0.1 мм отмечены более высокие содержания меди, цинка, свинца.

Для зерен халькопирита характерно тесное взаимопроращивание с вторичными сульфидами меди и пиритом с включениями микрочастиц пирита в матрицу халькопирита. Отмечена эмульсионная вкрапленность халькопирита, блеклой руды, галенита в матрице сфалерита. В тонких классах -0.044 мм возрастает доля вторичных сульфидов меди, в крупных классах блеклые руды образуют сростки с халькопиритом, сфалеритом, пиритом и породными минералами, а в шламовых классах свободные зерна галенита до 90 %. В классе крупности $-0.074+0.044$ мм свободные зерна и сростки галенита распределены поровну, чаще встречаются ассоциации галенита с сфалеритом и пиритом. Раскрытие сростков сфалерита в классе -0.074 мм происходит на 64–78 %. В сфалерите имеются эмульсионные включения халькопирита, галенита и пирита.

Раскрытие сростков сульфидов во всех классах крупности неравномерное. В тонких классах крупности -0.044 мм пирит раскрыт на 90–95, галенит на 80–82, сфалерит на 70–71, пирит на 90–95, халькопирит на 80–85 %. В классе $-0.074+0.044$ мм раскрытие минералов меньше на 10–15 %. Неравномерная тонкозернистая структура сростков свойственна рудам Рубцовского и Талловского месторождений.

Наиболее характерно неравномерное распределение сростков в полиминеральных ассоциациях. Как показано на рис. 1–4, в установленных рядах минеральных ассоциаций халькопирита, вторичных минералов меди, блеклых руд, галенита, пирита, сфалерита и нерудных минералов в классах крупности руд Степного и Рубцовского месторождений нет четкой зависимости последовательного раскрытия минералов, которая в основном определяется генезисом формирования минералов в рудных образованиях [3, 26, 27].

В разработанных технологических схемах и режимах селективной флотации полиметаллических руд должны быть учтены основные особенности структуры минералов, ассоциаций породных минералов, опыт выбора режимов обогащения [3, 23–29]. Отмечено, что взаимные потери металлов в разноименных концентратах значительные — сульфидов меди и галенита в цинковом концентрате; вторичных минералов меди, сфалерита и пирита в цинковом концентрате; минералов меди, свинца и цинка в пиритных продуктах.

ВЫВОДЫ

Основное количество меди в рудах Степного месторождения приходится на сростки халькопирита в крупных классах; доля вторичных минералов меди возрастает в классе -0.044 мм; сульфатная и силикатная медь преобладает в свободном виде во всех классах крупности; блеклые руды в основном содержатся в крупных классах, чаще в сростках. Галенит преимущественно находится в закрытых сростках в крупных классах с халькопиритом, сфалеритом, пиритом и породными минералами; раскрываемость в классе $-0.074 + 0.044$ мм 50 %, в шламовых классах 80–90 %. Сфалерит не полностью раскрывается даже в шламовых классах и встречается в сростках с минералами меди, пиритом, галенитом; мономинеральные формы сфалерита практически отсутствуют во всех классах крупности. Раскрытие и выделение минералов при флотации осуществляется в последовательности: блеклые руды, вторичные сульфиды меди, корродированный пирит, галенит, сфалерит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зильбершмидт М. Г., Исаев В. А. Комплексное использование минеральных ресурсов. Кн. 1. — М.: МИСиС, 2016. — 346 с.
2. Классен В. И., Эренбург В. В. Флотируемость минеральных зерен разной крупности // ДАН СССР. — 1951. — № 5. — С. 855.
3. Митрофанов С. И., Барский Л. А., Самыгин В. Д. Исследование руд на обогатимость. — М.: Недра, 1981. — 287 с.
4. Козлова И. П. Особенности технологии обогащения полиметаллических руд на Рубцовской обогатительной фабрике // Создание высокотехнологических производств на предприятии ГМК: материалы конф. — Екатеринбург, 2013. — С. 35–37.
5. Пшеничный Г. Н. Блеклые руды колчеданных месторождений Южного Урала и некоторые пути повышения технологических показателей обогащения руд // Технологическая минералогия промышленных типов месторождений. — Л.: Наука, 1967. — С. 85–90.
6. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Каюмов А. А. Фракционное концентрирование на основе распределения минералов по крупности в схемах флотации массивных колчеданных руд цветных металлов // Цв. металлы. — 2016. — № 6. — С. 21–28.
7. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Проблемы разделения минеральных комплексов при переработке упорных массивных руд цветных металлов // Цв. металлы. — 2014. — № 5. — С. 16–23.
8. Плаксин И. Н., Хажинская Г. И. Влияние гранулометрической характеристики на флотируемость сульфидных минералов // Изв. АН СССР. Отделение технических наук. — 1947. — № 6. — С. 37–45.
9. Коптяев А. Ф., Корюкин Б. М. О закономерностях раскрытия сульфидов меди, цинка и железа при обогащении медно-цинковых руд колчеданных месторождений Урала. — Свердловск: Унипромедь, 1984. — С. 125–129.
10. Корюкин Б. М., Штерн Э. К., Семидалов С. Ю., Коптяев А. С., Филиппова Н. А. Взаимосвязь структуры и состава сульфидов колчеданных месторождений с технологией их переработки. Роль технологической минералогии в развитие сырьевой базы СССР. — Л.: Механобр, 1983. — С. 145–159.

11. **Ma X. and Bruckard W. J.** Rejection of arsenic minerals in sulfide flotation — a literature review, *Int. J. Miner. Process.*, 2009, Vol. 93. — P. 89–94.
12. **Long G., Peng Y., and Bradshaw D.** Flotation separation of copper sulphides from arsenic minerals at Rosebery copper concentrator, *J. Min. Eng.*, 2014, 66–68. — P. 207–214.
13. **Bruckard W. J., Sparrow G. J., and Woodcock J. T.** A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulphides, *Int. J. of Mineral Processing*, 2011, Vol. 100, No. 1/2. — P. 1–13.
14. **Chen X and Peng Y.** The effect of regrind mills on the separation of chalcopyrite from pyrite in cleaner flotation, *Minerals Engineering*, 2015, Vol. 83. — P. 33–43.
15. **Lin H. K., Walsh D. E., Sonderland S. H., Bissue C., and Debrah A.** Flotability of metallic iron fines from comminution circuits and their effect on flotation of a sulfide ore, *Minerals and Metallurgical Proc.*, 2008, Vol. 25, No. 4. — P. 206–210.
16. **Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Каюмов А. А.** Флотационное обогащение блеклых руд // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 130–137.
17. **Богданов О. С., Максимов И. И., Поднек А. К., Янис Н. А.** Теория и технология флотации руд. — М.: Недра, 1990. — 363 с.
18. **Абрамов А. А.** Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. — Т. III, Кн. 1; — Т. III, Кн. 2. — М.: МГГУ, 2005. — 575 с.; 2006. — 472 с.
19. **Brion D.** Photoelectron spectroscopic study of the surface degradation of pyrite (FeS₂), chalcopyrite (CuFeS₂), sphalerite (ZnS) and galena (PbS) in air and water, *Applied Surface Science*, 1980, Vol. 5. — P. 133–152.
20. **Peng Y., Grano S., Fornasiero D., and Ralston J.** Control of grinding conditions in the flotation of chalcopyrite and its separation from pyrite, *Int. J. of Mineral Processing*, 2003, Vol. 69, No. 1–4. — P. 87–100.
21. **Глембоцкий В. А., Дмитриева Г. М.** Влияние генезиса минералов на их флотационные свойства. — М.: Наука, 1965. — 108 с.
22. **Митрофанов С.И.** Селективная флотация. — М.: Недра, 1968. — 583 с.
23. **Игнаткина В. А., Бочаров В. А.** Особенности флотации разновидностей сульфидов меди и сфалерита колчеданных руд // Горн. журн. — 2014. — № 12. — С. 75–79.
24. **Конев В. А.** Флотация сульфидов. — М.: Недра, 1985. — 259 с.
25. **Бакинов К. Г.** Ионный состав пульпы при бесцианидном разделении медно-свинцовых концентратов // Тр. Механообра. — 1985. — Т. 2. — С. 334–348.
26. **Owusu C., Brito e Abreu S., Skinner W., Addai-Mensah J., and Zanin M.** The influence of pyrite content on the flotation of chalcopyrite/pyrite mixtures, *Minerals Engineering*, 2014, Vol. 55. — P. 87–95.
27. **Изоитко В. М.** Технологическая минералогия и оценка руд. — СПб.: Наука, 1997. — 532 с.
28. **Gonçalves K. L. C., Andrade V. L. L., and Peres A. E. C.** The effect of grinding conditions on the flotation of a sulphide copper ore, *Minerals Engineering*, 2003, Vol. 16. — P. 1213–1216.
29. **Игнаткина В. А., Бочаров В. А.** О взаимодействии компонентов флотационной сульфидной пульпы // Горн. журн. — 2007. — № 12. — С. 78–83.

Поступила в редакцию 6/VII 2018