

УДК 622.794 : 622.78 + 622.17 : 622.7.097

**МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХАЛЬКОПИРИТА И СФАЛЕРИТА
В ОТХОДАХ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ РУД
В СВЕТЕ ПЕРСПЕКТИВ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ
ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Е. А. Горбатова^{1,2}, Е. Г. Ожогина², М. В. Рыльникова¹, Д. Н. Радченко¹

¹*Институт проблем комплексного освоения недр им. Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: rylnikova@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

²*Всероссийский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского,
Старомонетный пер., 31, 119017, г. Москва, Россия*

Целенаправленное формирование техногенных месторождений связано с созданием условий, при которых в ходе хранения техногенного сырья оно будет приобретать заданные технологические свойства. Это обеспечит возможность экологически безопасной разработки объектов отходов добычи и переработки сырья в будущем. Для выявления наиболее общих закономерностей формирования технологических свойств отходов обогащения медноколчеданных руд выполнены комплексные исследования минералогического состава хвостов трех обогатительных фабрик Южного Урала, перерабатывающих руды шести крупных медноколчеданных месторождений. Изучены и систематизированы кристаллохимические формулы основных рудных минералов. Определены морфологические разновидности рудных минералов. Установлено, что даже на генетически однотипных месторождениях режимы и параметры технологических процессов эксплуатации текущих хвостов обогащения зависят от исходных минералогических особенностей отходов, на базе которых осуществляется формирование техногенных месторождений. Эти особенности влияют на механизмы и этапы вторичного минералообразования в массивах формируемых техногенных месторождений.

Медноколчеданные месторождения, минералогические особенности, кристаллохимическая формула, растровая электронная микроскопия, хвосты обогащения, халькопирит, сфалерит, примесный состав, техногенные месторождения, целенаправленное формирование, комплексное освоение

DOI: 10.15372/FTPRPI20180517

Цветные металлы, извлекаемые из медноколчеданных руд, — востребованное на мировом рынке сырье, спрос на которое постоянно растет. Для сохранения, а в перспективе увеличения объемов получения цветных металлов при условии обеспечения экологического равновесия в окружающей среде актуальным является вовлечение в переработку не только природных типов руд, но и накопленных отходов обогащения. Значительная часть хвостохранилищ, в которых запасы и содержание ценных компонентов приближены к запасам природных месторождений, в дальнейшем могут быть переведены в разряд техногенных и вовлекаться в эксплуата-

Исследования выполнены в рамках программы Президиума РАН № 39, раздел 2.

цию, а отходы рассматриваются как дополнительное рудное минеральное сырье [1]. Наиболее перспективно целенаправленное формирование техногенных месторождений с заданными свойствами сырья для его разработки в будущем [2–4].

Исследование химического и минерального составов, строения и морфологии текущих хвостов обогащения колчеданных руд Учалинского, Узельгинского, Александринского, Майского, Юбилейного и Сибайского месторождений Южного Урала, формирующихся при переработке руд на Учалинской, Александринской и Сибайской обогатительных фабриках, позволяет на основе прогнозной оценки технологических свойств текущих хвостов обогащения колчеданных руд выбрать предпочтительные методы подготовки и технологию вовлечения отходов горно-обогатительного производства в эффективную промышленную эксплуатацию.

Цель настоящей работы — исследование закономерностей формирования технологических свойств отходов обогащения медноколчеданных руд в ходе их эффективной промышленной эксплуатации.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полная и достоверная информация о природных и технологических свойствах и состоянии запасов техногенных минеральных ресурсов может быть получена комплексом минералогическими методами, позволяющими принимать решение об эффективности и безопасности вовлечения хвостов в переработку в зависимости от потребности в них [5, 6]. В исследованиях применялись методы химического анализа, масс-спектропии, фазового анализа, оптической микроскопии, микродиффузионного анализа, растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгеновской микротомографии.

Методами аналитической химии определялись содержания основных элементов Cu и Zn в текущих хвостах обогащения и их распределение в классах крупности. Масс-спектрометрический метод с индуктивно связанной плазмой позволил установить содержание микроэлементов, присутствующих в хвостах обогащения, в концентрациях до 10^{-10} % [7, 8]. С использованием химического фазового анализа уточнено содержание фаз текущих хвостов обогащения, выявленных и предварительно идентифицированных другими методами, например оптической микроскопией.

Для определения морфологии и взаиморасположения минеральных агрегатов, характера срастания рудообразующих минералов, минерального состава, размера и формы индивидов, а также внутреннего строения рудных минералов применена оптическая микроскопия (минералогическая, оптико-петрографический и оптико-геометрический методы) [9]. Рентгенографическим количественным фазовым анализом диагностирована и дана количественная оценка всех раскристаллизованных фаз, размер кристаллитов которых более 0.02 мкм.

Особенности состава и строения главных рудных минералов, диагностика минералов, присутствующих в весьма незначительных количествах и имеющих микро- и нанометровую размерность, выявлены и изучены аналитической электронной микроскопией. Следует подчеркнуть, что надежная идентификация этих фаз подтверждена микродифракционным анализом.

Морфоструктурные параметры гетерогенных объектов — неоднородность/поликомпонентность состава исследуемых текущих хвостов обогащения, морфометрические и гранулометрические характеристики индивидов установлены методом рентгеновской микротомографии [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Текущие хвосты обогащения колчеданных руд являются минеральными образованиями, сформированными обломками минералов и минеральных агрегатов преимущественно беспорядочной текстуры. Структура кластическая, по составу обломков — кристалло- и литокластическая, по размеру обломков — мелко- и среднеобломочная [11].

Исследованные текущие хвосты обогащения руд Юбилейного, Майского, Сибайского и Учалинского месторождений относятся к глинистым алевритам, средневзвешенный диаметр этих хвостов 0.026–0.061 мм. Хвосты обогащения руд Александринского месторождения представлены глинисто-песчаным алевритом, средневзвешенный диаметр 0.127 мм. Они неоднородны по гранулярному составу, так как коэффициент неоднородности зерен > 3 . Геометрическая форма обломков минеральных агрегатов и индивидов хвостов обогащения изменяется от изометричной до прямоугольной с ровными и менее извилистыми границами.

Минералы, слагающие исследуемые материалы, отличаются самой разнообразной формой, определяющей строение агрегатов. Кристаллически-зернистые агрегаты сформированы зернами идиоморфной, гипидиоморфной, аллотриоморфной, пойкилитовой и интерстиционной форм. Для агрегатов коллоидного строения типичны фрамбоидальные образования. Реликтовые структуры замещения, разъедания, а также эмульсионная, каемчатая, осколочная обусловлены сложным взаимоотношением минералов [12, 13].

Особенности химического и минерального составов текущих хвостов обогащения колчеданных руд определяются формационным типом месторождения, промышленным сортом руды и циклом выделения технологической схемы обогащения. Главными ценными компонентами отходов обогащения являются медь и цинк. Они образуют самостоятельные минералы и изоморфно входят в структуру рудных минералов.

Содержание цветных металлов в текущих хвостах обогащения руд разных месторождений и циклов флотации неодинаковое, более перспективны отходы обогащения руд Учалинского и Александринского месторождений, а также хвосты обогащения руд Сибайского и Юбилейного месторождений (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Содержание меди и цинка в текущих хвостах обогащения колчеданных руд

Химический элемент	Месторождение							
	Сибайское		Майское		Юбилейное		Александринское	Учалинское
	Цикл флотации, в котором отобрана проба хвостов обогащения							
	коллективный	основной	коллективный	основной	коллективный	основной	основной	основной
Cu	0.09	0.48	0.06	0.09	0.02	0.54	0.25	0.20–0.40
Zn	0.03	1.00	0.21	0.47	0.16	1.36	0.52	0.61–0.95

Важным критерием оценки технологических свойств хвостов обогащения является закономерность распределения ценных компонентов по классам крупности. В основном, на 89 %, цветные металлы сконцентрированы в классе крупности $-0.044 + 0$ мм. Исключение — хвосты обогащения руд Александринского месторождения, где 38.66 % меди и 52.39 % цинка сосредоточены в классе крупности $+0.074$ мм. Такое распределение ценных компонентов определяет возникновение экологических проблем, связанных со складированием хвостов в хвостохранилища намывного/наливного типа методом простого сброса пульпы. Агрессивная среда хвостохранилищ обуславливает интенсивные процессы вторичного минералообразования с формированием легкорастворимых минеральных форм. Проблема выноса токсичной пыли и легкорастворимых минеральных форм представляет существенный фактор отрицательного воздействия на среду обитания.

В настоящее время требуется изменение подходов к проектированию горнотехнических систем, в первую очередь путем отказа от создания на горных предприятиях гидротехнических сооружений. Ранее для переработки хвостов обогащения медноколчеданных руд были предложены технологии их кучного выщелачивания после предварительного окомкования [14–16]. Исследования показали, что в случае отказа от переработки текущих хвостов этим методом их складирование после предварительной грануляции будет экологически более безопасным, чем намыв.

Результаты исследований гранул на основе окомкованных хвостов обогащения медноколчеданных руд методом рентгеновской томографии приведены на рис. 1. Показана высокая макро- и микропористость окатышей, ранее установленная оптическими методами [14, 15], что подтверждает благоприятную фильтрацию растворов через массив техногенного сырья, представленного окомкованными хвостами. Данный факт характеризует технологические возможности управления стоками хвостохранилища нового типа, поступающими в ходе осадков либо подаваемыми специально в целях формирования заданных свойств сырья для его освоения в будущем. Закономерности такой геохимической подготовки применительно к медноколчеданному сырью приведены в [15]. Эффективность геохимической подготовки техногенного массива на основе окомкованных хвостов обогащения определяется равномерным распределением рудных минералов в объеме окатыша, о чем свидетельствуют результаты рентгеновской томографии (рис. 1). Контроль физико-химических параметров среды техногенного массива, сложенного пористыми окатышами, позволяет управлять процессами вторичного минералообразования для более эффективной последующей разработки техногенного образования по сравнению с хаотично формируемыми хвостохранилищами.

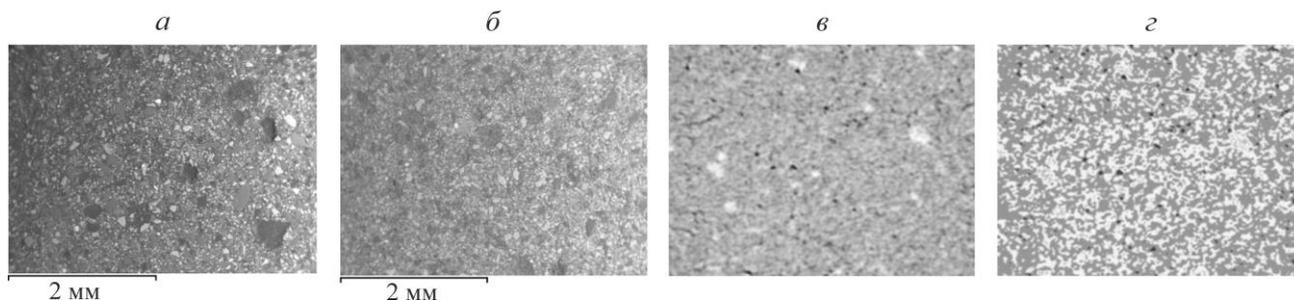


Рис. 1. Результаты качественного (*а, б*) и количественного (*в, г*) исследования окатышей методом рентгеновской томографии: *а* — распределение пор; *б* — минеральные фазы (кварц, гидроокислы железа, пирит, сфалерит, алюмосиликаты железа, соединение кальция); *в* — микропоры < 5 %, гипс 2–5 %, кварц 31.5–37.0 %, *г* — пирит 56–63 %, сфалерит 1.2–2.0 %, халькопирит 1.0–1.5 %

Принципиальная технологическая схема формирования хвостохранилищ нового типа на горных предприятиях, осваивающих месторождения медноколчеданных руд, представлена на рис. 2. Схема включает операции обезвоживания хвостов обогащения медноколчеданных руд после окомкования [14–17] и формирования массива техногенного месторождения. Учитывая, что на медноколчеданных месторождениях хвосты обогатительных фабрик на Учалинском и Гайском ГОКах уже подвергаются частичному обезвоживанию методом сгущения перед складированием в карьер [18, 19], дополнительные затраты на фильтрацию хвостов с получением материала, пригодного для окомкования, компенсируются отсутствием затрат на формирование и обслуживание мощного гидротехнического сооружения, каким является хвостохранилище.

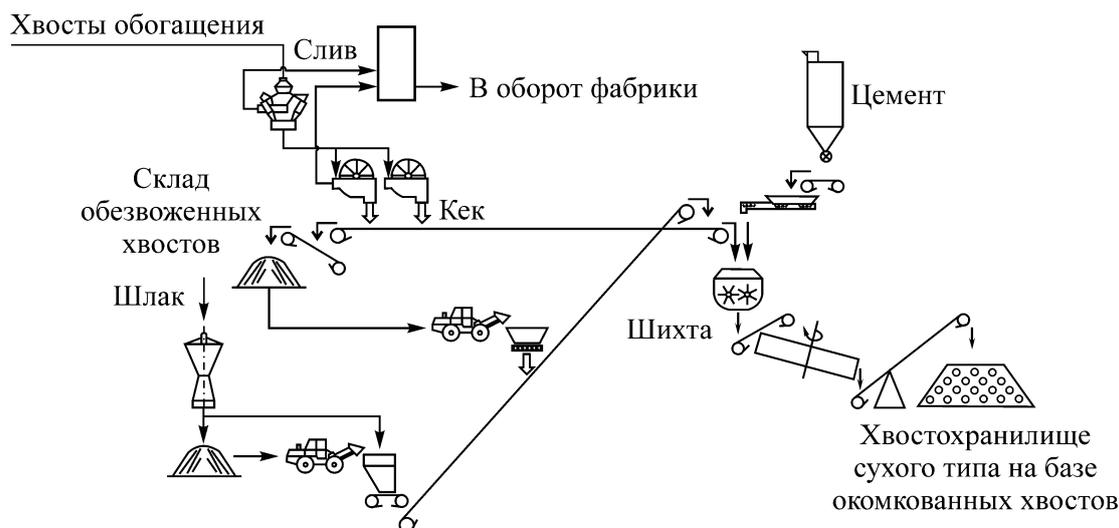


Рис. 2. Технологическая схема организации хвостохранилища нового типа при переходе на управляемое обращение с отходами обогащения медноколчеданных руд

Реализация этого подхода требует новых проектных решений по организации участка формирования техногенных месторождений. Планировочные решения по участку включают строительство установок с размещенным оборудованием для обезвоживания, емкостей для хранения технологической воды и водоподготовки, склада обезвоженных хвостов, участка окомкования, силосов и складов с вяжущими материалами. Земельный отвод, требуемый для укладки окомкованного сырья на изолированное основание, наращивается по мере работы обогатительной фабрики. Мощность штабеля будет зависеть от состава шихты и целей формирования техногенного месторождения. Избыточный сток воды собирается и направляется в оборот фабрики. По мере отработки техногенного месторождения отходы могут быть утилизированы и использованы для закладки выработанного пространства. Освобожденная площадь земельного отвода используется для иных технологических целей либо рекультивируется.

Основными минералами, которыми представлено хранилище хвостов обогащения медноколчеданных руд нового типа, являются пирит, халькопирит — до 1 %, сфалерит — до 2 %. В незначительном количестве поступают галенит, пирротин, арсенопирит, магнетит, ильменит, теннантит, теллуrowисмутит и фрейбергит. Главный нерудный минерал — кварц, содержание которого варьирует от 2 до 61 %. В подчиненном количестве встречаются серицит, кальцит, сидерит, барит, хлорит, гипс, тальк, иллит. Химический состав основных рудных минералов — халькопирита и сфалерита — крайне неравномерный.

Методами локального рентгеноспектрального анализа установлено, что химический состав халькопирита не постоянен. Например, изоморфно в структуру кристаллической решетки CuFeS_2 исследуемых месторождений входит мышьяк — до 1.11 % (хвосты обогащения руд Александринского месторождения) и цинк — до 1.77 % (хвосты обогащения руд Майского месторождения) (табл. 2).

Рентгеноспектральным анализом установлено, что в химический состав сфалерита во всех хвостах обогащения изоморфно входит железо, его содержание достигает 23 %. Для хвостов обогащения руд Сибайского, Юбилейного, Александринского и Учалинского месторождений в ZnS характерно достаточно высокое содержание изоморфных примесей меди (0.78–3.98 %), для хвостов обогащения руд Сибайского месторождения — мышьяка (2.53 %) (табл. 3).

ТАБЛИЦА 2. Химический состав и кристаллохимическая формула халькопирита исследуемых месторождений по данным локального рентгеноспектрального анализа, %

Месторождение	Компонент					Кристаллохимическая формула
	Fe	Cu	Zn	As	S	
Юбилейное	34.69	28.99	—	—	36.33	$\text{Cu}_{0.81}\text{Fe}_{1.1}\text{S}_{2.0}$
	33.10	30.34	—	—	36.94	$\text{Cu}_{1.00}\text{Fe}_{0.99}\text{S}_{2.0}$
	30.90	33.00	—	—	33.70	$\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{1.05}\text{S}_{2.0}$
Александринское	31.93	—	72.68	—	29.77	$\text{Cu}_{1.08}\text{Fe}_{1.12}\text{S}_{2.0}$
	14.33	2.30	51.03	—	32.34	$\text{Cu}_{1.36}\text{Fe}_{1.4}(\text{As}_{0.03}\text{S}_{1.97})_{2.0}$
Майское	33.38	36.48	—	—	29.72	$\text{Cu}_{1.24}\text{Fe}_{1.29}\text{S}_{2.0}$
	31.93	37.46	1.77	—	28.83	$\text{Cu}_{1.31}\text{Fe}_{1.27}\text{Zn}_{0.06}\text{S}_{2.0}$
	34.00	36.55	—	—	29.45	$\text{Cu}_{1.25}\text{Fe}_{1.33}\text{S}_{2.0}$
Сибайское	39.06	18.99	—	—	41.95	$\text{Cu}_{0.46}\text{Fe}_{1.33}\text{S}_{2.0}$
	31.52	29.04	—	—	39.44	$\text{Cu}_{0.74}\text{Fe}_{1.07}\text{S}_{2.0}$
	31.15	32.94	—	—	35.91	$\text{Cu}_{0.93}\text{Fe}_{1.0}\text{S}_{2.0}$

ТАБЛИЦА 3. Химический состав и кристаллохимическая формула сфалерита по данным локального рентгеноспектрального анализа, %

Месторождение	Компонент					Кристаллохимическая формула
	Fe	Cu	Zn	As	S	
Юбилейное	5.36	0.73	63.28	—	30.63	$(\text{Zn}_{1.01}\text{Fe}_{0.1}\text{Cu}_{0.01})_{1.12}\text{S}_{1.0}$
	7.17	3.98	58.21	—	30.64	$(\text{Zn}_{0.93}\text{Fe}_{0.13}\text{Cu}_{0.07})_{1.13}\text{S}_{1.0}$
Учалинское	2.18	—	67.13	—	30.69	$(\text{Zn}_{1.07}\text{Fe}_{0.04})_{1.11}\text{S}_{1.0}$
	4.73	2.69	61.84	—	30.74	$(\text{Zn}_{0.99}\text{Fe}_{0.09}\text{Cu}_{0.04})_{1.12}\text{S}_{1.0}$
	5.26	—	63.29	—	31.45	$(\text{Zn}_{0.99}\text{Fe}_{0.1})_{1.09}\text{S}_{1.0}$
Александринское	0.54	—	72.68	—	29.77	$(\text{Zn}_{1.33}\text{Fe}_{0.01})_{1.34}\text{S}_{1.0}$
	14.33	2.30	51.03	—	32.34	$(\text{Zn}_{0.77}\text{Fe}_{0.25}\text{Cu}_{0.04})_{1.06}\text{S}_{1.0}$
Майское	0.60	—	70.49	—	28.92	$(\text{Zn}_{1.19}\text{Fe}_{0.01})_{1.2}\text{S}_{1.0}$
	23.76	—	39.40	—	36.84	$(\text{Zn}_{1.33}\text{Fe}_{0.01})_{1.34}\text{S}_{1.0}$
Сибайское	5.97	0.72	62.69	—	30.61	$(\text{Zn}_{1.00}\text{Fe}_{0.11}\text{Cu}_{0.01})_{1.12}\text{S}_{1.0}$
	5.58	—	55.85	2.53	36.05	$(\text{Zn}_{0.76}\text{Fe}_{0.09})_{0.85}(\text{S}_{1.0}\text{As}_{0.03})_{1.03}$
	7.34	2.89	55.84	—	33.93	$(\text{Zn}_{0.81}\text{Fe}_{0.12}\text{Cu}_{0.04})_{0.97}\text{S}_{1.0}$

Полученные результаты позволили выдвинуть идею, что на медноколчеданных месторождениях в случае перехода на хвостохранилища нового типа на базе окомкованных хвостов обогащения целесообразно при складировании формировать техногенные месторождения с учетом типа обогащаемой руды и примесного состава представленных в них рудных минералов (рис. 3).

Согласно предложенной технологии, предусмотрено формирование участков техногенного массива с повышенным содержанием мышьяка, меди, цинка, с высоким содержанием благородных металлов и металлов платиновой группы. Если при традиционном намыве в хвостохранилище, в ходе усреднения минеральной массы происходит искусственное рассеяние минералов, то при селективном складировании будет обеспечено предотвращение безвозвратных потерь этих ценных элементов.

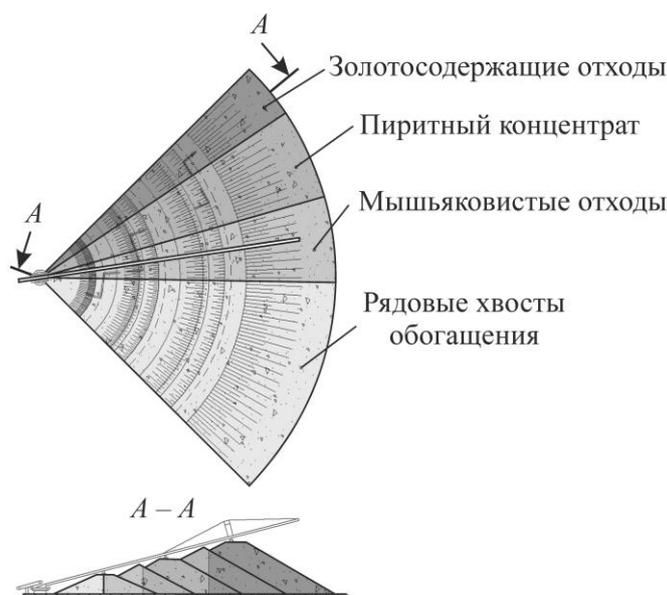


Рис. 3. Принцип селективного формирования техногенных месторождений на основе окомкованных хвостов обогащения медноколчеданных руд с учетом примесного состава рудных минералов

В ходе исследований минералогических особенностей хвостов обогащения медноколчеданных руд шести месторождений Южного Урала — Учалинского, Узельгинского, Александринского, Майского, Юбилейного и Сибайского определены наиболее общие закономерности техногенного преобразования рудных минералов в ходе обогащения.

Установлено, что халькопирит в хвостах обогащения встречается в виде свободных зерен и минеральных сростков. По минеральному составу сростки подразделяются на мономинеральные (халькопиритовые), биминеральные (халькопирит-пиритовые, халькопирит-сфалеритовые и др.) и полиминеральные (халькопирит-сфалерит-пиритовые и др.).

Свободные зерна халькопирита имеют блочное строение, нарушены трещиноватостью (рис. 4). Размер зерен исследуемых проб не превышает 80 мкм. Установленные морфометрические особенности зерен халькопирита в текущих хвостах обогащения медноколчеданных руд позволяют прогнозировать требуемые параметры процессов геохимической подготовки и выщелачивания при целенаправленном формировании техногенных месторождений на основе окомкованных отходов.

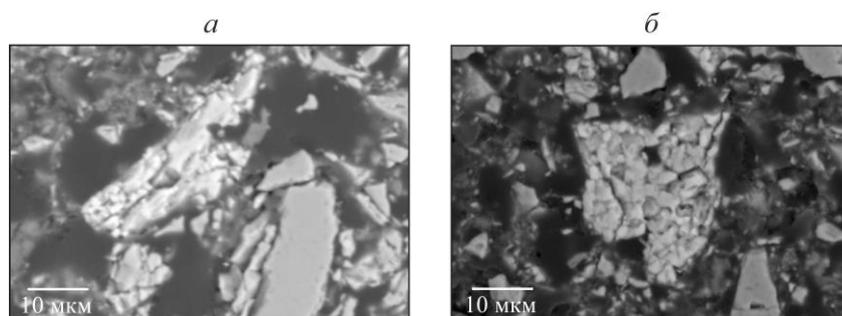


Рис. 4. Внешний вид свободных зерен халькопирита: трещиноватые зерна халькопирита продолговатой формы продольным размером 50 мкм (а) и округлой формы диаметром 40 мкм (б)

В минеральных агрегатах халькопирит образует следующие морфологические разновидности: кристаллическую, эмульсионную, реликтовую и коррозионную [12]. Кристаллический халькопирит представлен аллотриоморфными выделениями, форма которых определяется конфигурацией пор, трещинных полостей, межслоевого пространства и интерстициями зернистых агрегатов пирита. Халькопирит заполняет интерстиции в зернистых агрегатах пирита (рис. 5а, б) и полости в брекчированном пирите (рис. 5в). В ткани зерен пирита халькопирит образует небольшие включения размером 4–8 мкм (рис. 5г). Границы между минералами четкие, в большинстве случаев неровные. Отметим, что выделения халькопирита среди нерудных минералов также носят ксеноморфный характер.

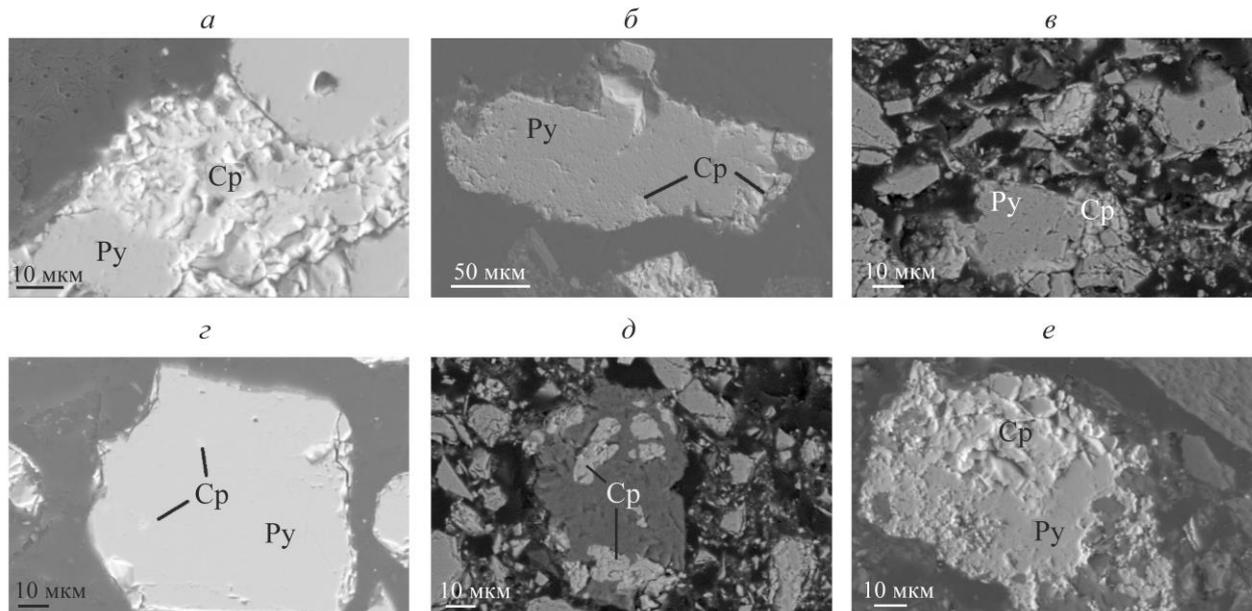


Рис. 5. Выделения халькопирита в минеральных сростках: а, б — заполнение интерстиций между зернами пирита; в — заполнение полостей трещин в брекчированном пирите; г — ксеноморфное выделение в пиритовой массе; д — ксеноморфные выделения в кварц-серицитовой массе; е — реликты халькопирита. РЭМ

В сфалерите часто наблюдаются эмульсионные и пластинчатые включения халькопирита размером 0.002–0.0085 мм, раскрытие такой вкрапленности невозможно, что приводит к снижению селективности разделения минералов при флотации [13] и определяет предпочтительность физико-химических методов переработки отходов.

Реликтовый халькопирит — результат частичного его замещения сфалеритом по трещинкам, границам зерен и агрегатов с образованием структур разъедания (рис. 5д). Границы между минеральными агрегатами неровные, зубчатые. Для агрегата халькопирита характерны выпуклые границы, для агрегата сфалерита — глубоко проникающие в виде заливов и микропрожилок.

Коррозионная структура халькопирита выражается в замещении пирита халькопиритом, где проникновение халькопирита вовнутрь наблюдается с периферии и по трещинам, образуя сложные границы минералов (рис. 5е).

Халькопирит в хвостах обогащения сосредоточен в классе крупности –0.044 мм и составляет от 46.8 до 94.8 %. Он встречается в виде сростков с пиритом — 25.8–80.0 %, сфалеритом — 1.4–3.6 %, реже с нерудными минералами. В свободных зернах халькопирит преобладает в классе –0.044 мм до 19.3 %. Поверхность свободных зерен сфалерита неровная, трещиноватая (рис. 6). Размер не превышает 95 мкм.

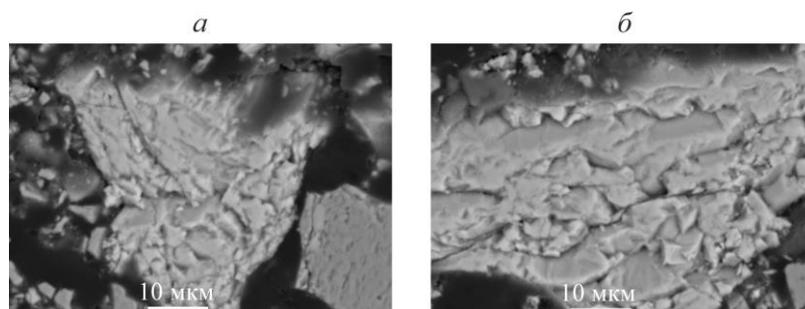


Рис. 6. Внешний вид свободных зерен сфалерита, характеризующих состояние их поверхности размерами 50 мкм (*a*) и 95 мкм (*б*). РЭМ

Сфалерит представлен двумя распространенными морфологическими разновидностями — кристаллической и коррозионной [12]. Кристаллический сфалерит тесно ассоциирует с пиритом, халькопиритом, галенитом, кварцем и серицитом. Он заполняет интерстиции и полости трещин в кристаллических и брекчированных агрегатах пирита, подчиняясь его форме выделений. С халькопиритом образует тесные сростания с взаимным проникновением друг в друга и небольшие ксеноморфные выделения в кварц-серицитовых массах (рис. 7). Коррозионный сфалерит, иногда совместно с халькопиритом, замещает пирит по периферии минерального агрегата или проникает по трещинам с образованием скелетных форм или реликтов при его глубоком разъедании (рис. 7е).

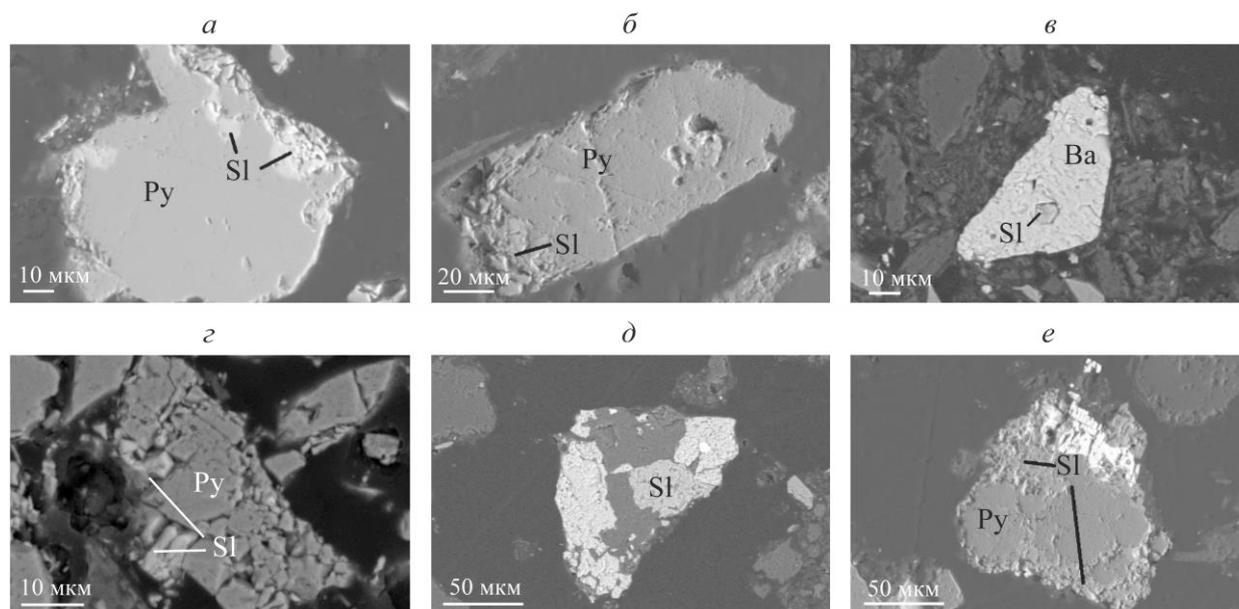


Рис. 7. Выделения сфалерита в минеральных сростках: *a*, *б* — ксеноморфные выделения в пирите; *в* — изометричное выделение в барите; *г* — заполнение полостей трещин в брекчированном пирите; *д* — изометричное выделение сфалерита в полиминеральном сростке; *е* — заполнение интерстиций между зернами пирита с частичным замещением. РЭМ

Сфалерит в хвостах обогащения, в основном от 73.2 до 93.8 %, встречается в классе крупности -0.044 мм, за исключением хвостов обогащения руд Александринского месторождения, где 52.4 % сфалерита сосредоточено в классе $+0.074$ мм. Он образует сростки с пиритом (до 51.7%), реже с пиритом и халькопиритом, нерудными минералами. В свободных зернах сфалерит преобладает в классе -0.044 мм от 9.95 % в хвостах обогащения руд Александринско-

го месторождения до 30 % и более в хвостах других колчеданных месторождений. Эти закономерности определяют выбор способа формирования техногенных месторождений — сухое наращивание штабелей на основе окомкованного сырья в целях экологически безопасного хранения либо последующего освоения после геохимической подготовки.

ВЫВОДЫ

Текущие хвосты обогащения руд цветных металлов содержат в значительных количествах недоизвлеченные ценные компоненты — медь и цинк, образующие самостоятельные минералы халькопирит — до 1 % и сфалерит — до 2 % и представляющие промышленный интерес при вовлечении отходов в переработку.

При отказе от намыва хвостохранилищ и переходе на стратегию целенаправленного формирования на основе отходов целесообразен выбор технологий складирования после предварительного окомкования. Это обеспечит возможность протекания физико-химических процессов в техногенных массивах и снизит загрязнение окружающей среды за счет выноса пыли. Главными минералами, образующими исследуемые пробы хвостов обогащения, являются пирит и кварц, их содержание в хвостах обогащения достигает 84 и 61 % соответственно.

Основные рудные минералы меди и цинка встречаются в виде свободных зерен чаще всего блочного строения, нарушенного трещиноватостью, и минеральных сростков. К морфологическим разновидностям рудных минералов относятся кристаллические, эмульсионные, реликтовые и коррозионные образования. Большинство сульфиды меди и цинка имеют крупность менее 0.044 мм. Исключением являются хвосты обогащения руд Александринского месторождения, в которых 38.66 % меди и 52.39 % цинка сосредоточены в классе более 0.074 мм.

Неоднородность состава и строения текущих хвостов обогащения колчеданных руд необходимо учитывать при выборе технологии переработки и/или утилизации в настоящее время и в будущем с учетом примесного состава рудных минералов при складировании окомкованных хвостов сухим способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К. Н., Чантурия В. А., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья. — М.: Наука, 2010. — 437 с.
2. Трубецкой К. Н., Захаров В. Н., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Эффективные технологии использования техногенных георесурсов — основа экологической безопасности освоения недр // Горн. журн. — 2016. — № 5. — С. 34–40.
3. Трубецкой К. Н., Рогов Е. И., Уманец В. Н. Обоснование объемов и сроков освоения техногенных месторождений // Горн. журн. — 1988. — № 2. — С. 9–12.
4. Трубецкой К. Н., Уманец Н. Б., Никитин В. Н. Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия // Горн. журн. — 1989. — № 12. — С. 6–9.
5. Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. Технологическая минералогия в решении проблем комплексного освоения полезных ископаемых // Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ: сб. статей по материалам докладов I Рос. семинара по технол. минералогии. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. — С. 17–21.
6. Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. Прогнозная оценка минерального сырья методами прикладной минералогии // Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии: сб. статей по материалам докладов VII Рос. семинара по технол. минералогии. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. — С. 46–49.

7. **Alan R. and Alan L.** Determination of trace elements in geological samples by inductively coupled plasma source mass spectrometry, *Spectrochimica Acta, Part B: Atomic Spectroscopy*, 1985, Vol. 40, Issues 1–2. — P. 115–122.
8. **Yin Xue-Bo, Zhigang Zeng, and Li San-Zhong.** Determination of trace elements in sulfide samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry, *Chinese J. of Analytical Chemistry*, 2011, 39 (8). — P. 1228–1232.
9. **Subramanian S., Tammishetti V., and Pradip B. R.** Concurrent reconciliation of chemical and mineral assays for mineral processing circuits, *Int. J. of Min. Proc.*, 2015, Vol. 146. — P. 1–9.
10. **Schena G., Piller M., and Zanin M.** Discrete X-ray tomographic reconstruction for fast mineral liberation spectrum retrieval, *Int. J. of Min. Proc.*, 2016, Vol. 145. — P. 1–6.
11. **Горбатова Е. А., Емельяненко Е. А.** Технологическая характеристика хвостов обогащения Учалинского горно-обогатительного комбината // Комбинированная геотехнология: Комплексное освоение и сохранение недр Земли: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 2009. — Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2011. — С. 84–91.
12. **Горбатова Е. А., Горбатова Е. А.** Морфоструктурные особенности отходов обогатительного передела // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 7. — С. 38–42.
13. **Ожогина Е. Г., Горбатова Е. А.** Влияние морфоструктурного состава отходов обогащения руд цветных металлов на извлечение ценных компонентов при их гидрометаллургическом переделе // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2012. — № 1. — С. 10–12.
14. **Шадрунова И. В., Радченко Д. Н.** Совместная утилизация хвостов обогащения медно-цинковых руд и гранулированных шлаков медной плавки // ГИАБ. — 2003. — № 11. — С. 219–222.
15. **Рыльникова М. В., Горбатова Е. А., Емельяненко Е. А.** Условия и процессы вторичного минералообразования при эксплуатации медно-колчеданных месторождений. — М.: ИПКОН РАН, 2009. — 189 с.
16. **Пат. 2328536 РФ.** Состав шихты для получения окатышей для серно-кислотного выщелачивания текущих и лежалых хвостов обогащения медноколчеданных руд и способ получения окатышей с его использованием / М. В. Рыльникова, Д. Н. Радченко, И. А. Абдрахманов, А. Ф. Илимбетов. Приоритет от 25.09.2006 г. Заявка 2006133985/02. Патентообладатель: Учалинский горно-обогатительный комбинат.
17. **Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Илимбетов А. Ф., Звягинцев А. Г.** Опытнo-промышленная апробация технологии выщелачивания отходов переработки медноколчеданных руд // ГИАБ. — 2008. — № 2. — С. 293–301.
18. **Зотеев О. В., Калмыков В. Н., Гоготин А. А., Проданов А. Н.** Основные положения методики выбора технологии складирования отходов обогащения руд в подработанных подземными рудниками карьерах и зонах обрушения // Горн. журн. — 2015. — № 11. — С. 57–61.
19. **Ахмедьянов И. Х., Красавин В. П., Данилов О. Н., Григорьев В. В., Калмыков В. Н.** Горнотехническая рекультивация учалинского карьера с использованием обезвоженных хвостов обогащения // Горн. журн. — 2014. — № 7. — С. 24–29.

Поступила в редакцию 9/Х 2018