УДК (549.0:550.42)+553.3

**Ю.Б.МАРИН, Ю.Л.ГУЛЬБИН, В.О.ИЛЬЧЕНКО,
Д.А.ПЕТРОВ, А.А.САВИЧЕВ, В.В.СМОЛЕНСКИЙ**

*Санкт-Петербургский государственный горный институт
(технический университет)*

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РУД С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ПОНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Основными объектами исследований являлись месторождения благородных и цветных металлов Урала, Сибири и Новой Земли. Показано, что изучение изменчивости вещественного состава и стереометрических особенностей руд (с компьютерным моделированием важнейших типов минеральных агрегатов) в геологическом пространстве исключительно важно для понижения потерь полезных компонентов, прогнозирования технологических свойств минерального сырья и выявления условий рудообразования.

Main objects of the current investigation are deposits of noble and non-ferrous metals of Urals, Siberia and the archipelago Novaya Zemlya. It was shown, that the study of compositional and stereometric structural properties of ores (including computer simulation of the most characteristic mineral aggregates) is extremely important for the decrease of the loss of useful components, the prognosis of technological properties of mineral row materials, and the estimation of conditions of ore formation.

На основе онтогенического анализа проведены исследования руд ряда месторождений благородных и цветных металлов Урала, Сибири и Новой Земли для решения проблем рационального использования минерального сырья. Особое внимание обращено на выявление закономерностей изменчивости конституции минеральных индивидов и агрегатов в различных типах месторождений, а также компьютерное моделирование рудных агрегатов. Ранее показано [1], что недооценка сложности состава и условий размещения различных минеральных и геохимических ассоциаций на рудных месторождениях ведет к потере в процессе эксплуатации ценных компонентов и поступлению в окружающую среду потоков токсичных элементов, что приводит к резкому и быстрому изменению геохимической обстановки в горно-рудных районах. Без выявления форм нахождения полезных компонентов, подсчета объемов всех компонентов руд и околорудных образований, извлекаемых при различных схемах освоения месторождений, и оценки технологических свойств руд невозможны оптимизация схемы извлечения полезных компонентов, корректная экологическая оценка воздействия на окружающую среду, а в связи с этим и оценка целесообразности освоения месторождений. Поясним это на ряде примеров.

Месторождение Олимпиада (Енисейский кряж) несет комплексную Au-Sb-W минерализацию. Детальные минералого-геохимические исследования первичных руд показывают длительную историю их формирования, разнообразие форм нахождения золота и попутных компонентов в рудах [3]. Имеющие площадное распространение вкрапленные руды содержат тонкую (1-500 мкм) минерализацию золотосульфидной стадии. Самородное золото в них изредка встречается в сростках с арсенопиритом, но большая часть Au находится в арсенопирите в химически связан-

ном состоянии [3]. Минерализация золото-полиметаллической и золотоантимонитовой стадий слагает системы секущих кварцевых жил и прожилков. Минеральный состав таких образований разнообразен: сульфиды и сульфоантимониды Fe, Pb, Cu, Zn, теллуриды Bi и Hg. Самородное золото-2 часто содержит примесь Hg и встречается совместно с бертьеритом и джемсонитом. В ассоциации с антимонитом присутствует электрум и аурostибит. Результаты пробирного и полуколичественного спектрального анализов руд на Au и элементы-примеси обработаны с помощью метода главных компонентов факторного анализа. Геометризация значений факторов, отвечающих Au-As и Sb-Pb-Ag ± Au геохимическим ассоциациям, методом построения полиэлементных карт дала практически не накладывающиеся в пространстве ореолы развития разных типов руд, что позволяет планировать их селективное извлечение.

В рудах Гайского месторождения, типичного представителя колчеданных месторождений уральского типа, установлена благороднометальная минерализация. Золото присутствует в тонкодисперсной форме в раннем пирите и в видимой в поздних медно-полиметаллических ассоциациях, причем его содержание возрастает в 10 раз от ранних к поздним рудам. В этом же направлении содержание Au в виде примеси падает, а доля самородного золота растет. Самостоятельных минералов Ag не обнаружено. Обогащение руд серебра происходит аналогично Au от ранних руд к поздним. В поздних ассоциациях минералами-концентраторами Ag являются галенит, теннантит и борнит. В борните при прокаливании появляются мелкие (5-10 мкм) выделения самородного серебра. Содержание ЭПГ в рудах низко: на уровне 0,02-0,05 г/т. Установлены минералы-концентраторы ЭПГ: самородное золото (10-21,7 г/т Pt и 43,4-44,2 Pd) и борнит (0,37 г/т Pt и 0,02 Pd). При обогащении происходит переизмельчение халькопирита, сфалерита, борнита при одновременном недораскрытии их сростков с пиритом, что ведет к ухудшению технологических показателей. Повышение качества медного концентрата возможно при удалении свободных зерен пирита и сфалерита флотационной крупности +10 мкм. Повышение извлечения цинка может быть обеспечено выделением свободных зерен сфалерита флотационной крупности из медного концентрата и хвостов при разработке более эффективной технологии разделения халькопирита и сфалерита.

Большое значение для оценки технологических свойств руд имеют морфологические особенности минеральных индивидов [2]. Уже отмечалось, что неполное раскрытие минеральных сростков и их переизмельчение является основной проблемой при обогащении руд, поскольку приводят к загрязнению концентратов вредными примесями и потерям полезных компонентов [4]. Для исследования этой проблемы проведен морфометрический анализ руд Александринского медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал). Руды представлены двумя природными типами: сплошным и вкрапленным. Главные минералы руд – пирит, халькопирит, сфалерит и борнит, второстепенные – блеклые руды, галенит, кварц и барит. Для характеристики структурных особенностей руд были использованы методы фрактальной геометрии. Ранее было показано, что фрактальная размерность D выступает мерой извилистости межзеренных границ и может служить индикатором степени раскрываемости минеральных сростков. Максимальная точность оценок D, получаемых этим методом, составляет 0,01. В ходе исследования с помощью программы морфометрического анализа FractShop оценивалась фрактальная размерность границ зерен борнита и пирита.

Кристаллизация борнита между выделениями более ранних сульфидов обусловливает сложные очертания его зерен с большим количеством включений и входящих углов. На этом фоне сравнительно простой геометрией характеризуются зерна пирита. Наблюдаемые структурные особенности рудных агрегатов подчеркивают-

ся высоким средним значением фрактальной размерности сечений борнита (1,30) по сравнению с пиритом (1,16). Для изучения фрактальной геометрии межзеренных границ были выбраны агрегаты зерен пирита двух распространенных разновидностей руд: халькопирит-сфалерит-пиритовой и борнит-сфалерит-халькопиритовой. Оценивались значения фрактальной размерности границ следующих пар: пирит – халькопирит, пирит – сфалерит, пирит – барит и пирит – борнит. Для установления корреляций между полученными оценками D и степенью раскрытия минеральных сростков было проведено опытное измельчение в шаровой мельнице руд выделенных разновидностей (навески раздробленных руд массой 200 г). После измельчения и сушки пробы разделялись на четыре класса крупности с взвешиванием каждого класса. Из частиц класса –0,074 мм (поступающих на дальнейшее обогащение) были изготовлены искусственные шлифы. Для оценки степени раскрытия сростков пирита с другими минералами в шлифе оценивались доли свободных зерен и нераскрывшихся сростков пирита с халькопиритом, сфалеритом, борнитом и баритом в классе крупности – 0,074, %:

Проба	1	2
Свободный пирит	52	51
Пирит – халькопирит	26	2
Пирит – сфалерит	20	28
Пирит – борнит	–	16
Пирит – барит	2	3
Сумма	100	100

Учитывая, что раскрытие сростков при дроблении и измельчении руд происходит, в первую очередь, по границам зерен, для оценки степени раскрытия можно использовать коэффициент раскрываемости

$$X_i = (A - B)/A,$$

где A – коэффициент срастания зерен пирита с i-м минералом в рудах; B – доля нераскрывшихся сростков вида пирит – i-й минерал в измельченных рудах. Рассчитанные значения X_i приведены в таблице.

Степень раскрываемости сростков пирита

Проба	Вид сростков	Обозначение	D	Коэффициент срастания, %	Доля нераскрывшихся сростков, %	X_i
1	Пирит – халькопирит	Py-Cp	1,08	50	26	48
	Пирит – сфалерит	Py-Sl	1,12	35	20	43
	Пирит – барит	Py-Brt	1,03	15	2	87
2	Пирит – халькопирит	Py-Cp	1,07	10	2	80
	Пирит – сфалерит	Py-Sl	1,15	40	28	30
	Пирит – борнит	Py-Bor	1,10	30	16	47
	Пирит – барит	Py-Brt	1,03	20	3	85

Из таблицы следует, что коэффициент раскрываемости закономерно уменьшается с увеличением фрактальной размерности. Минимальными значениями коэффициента раскрываемости (повышенными значениями D) характеризуются сростки пирита со сфалеритом, борнитом и халькопиритом халькопирит-сфалерит-пиритовых руд; максимальными значениями коэффициента раскрываемости – сростки пирита с халькопиритом борнит-сфалерит-пиритовых руд и баритом. Рассчитанное значение коэффициента корреляции (–0,936) указывает на близкую к функциональной зависимость между переменными. Количественным выражением этой зависимости служит уравнение линейной регрессии $X = 590 - 489D$, позволяющее прогнозировать величину коэффициента раскрываемости по значению D с точностью ± 5 % (см. рисунок).

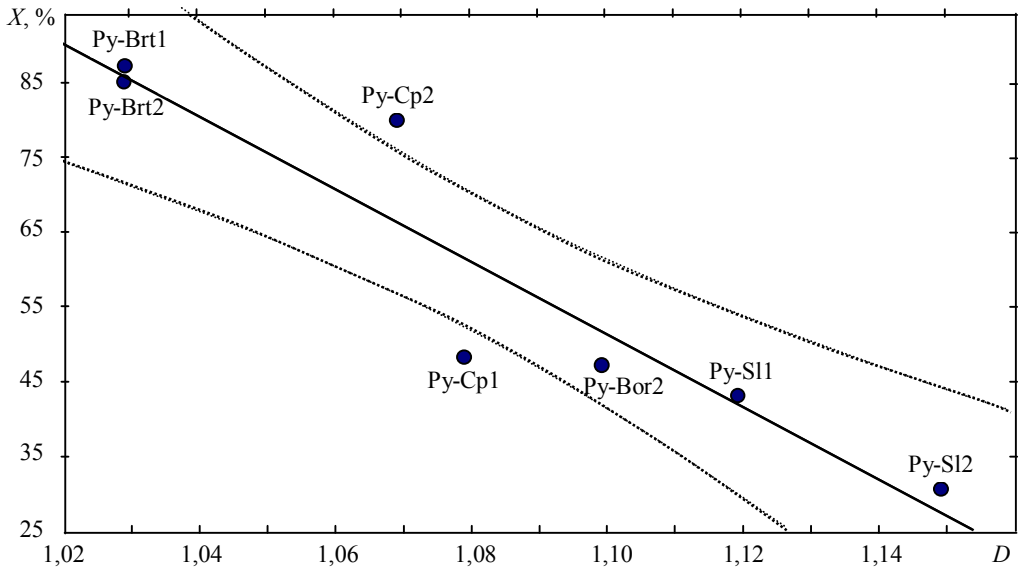


График корреляционной зависимости между фрактальной размерностью границ *D* и коэффициентом раскрываемости сростков *X*. Достоверность аппроксимации $R^2 = 0{,}877$. Границы доверительных интервалов проведены для 95-процентной вероятности

Итак, морфометрический анализ строения рудных агрегатов позволяет разработать онтогеническую модель их структуры, провести корреляцию между онтогенезом агрегата с одной стороны, стереометрическими характеристиками границ срастания минеральных зерен с другой. Количественным показателем степени раскрываемости минеральных сростков в ходе дробления может служить фрактальная размерность межзеренных границ. Использование этого показателя будет способствовать повышению эффективности технологического картирования и оптимизации схем обогащения.

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE).

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ конституции минеральных индивидов и агрегатов с целью создания основы для понижения потерь полезных компонентов и оценки воздействия на окружающую среду при освоении рудных месторождений / Ю.Б.Марин, Ю.Л.Гульбин, В.О.Ильченко, А.А.Савичев, В.В.Смоленский // Записки Горного института. СПб, 2003. Т.154. С.144-149.

2. *Бродская Р.Л.* Энергетическая характеристика внутренних границ и технологические свойства минеральных агрегатов / Р.Л.Бродская, Ю.Б.Марин // Доклады РАН. 2003. Т.344. № 5. С.654-657.

3. *Гавриленко В.В.* Золото-сульфидное оруденение Северо-Енисейского района (Сибирь) и условия его образования / В.В.Гавриленко, А.А.Савичев // Записки ВМО. 2003. № 2. С.15-32.

4. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. СПб: Наука, 1997. 592 с.