УДК (549.0:550.42)+553.3

Ю.Б.Марин, Ю.Л.Гульбин, В.В.Смоленский, В.О.Ильченко, А.А.Савичев

Санкт-Петербургский горный институт (технический университет)

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

Основными объектами исследований являлись месторождения благородных и цветных металлов Урала, Сибири и Новой Земли. Показано, что установление поминерального баланса распределения химических элементов в рудах, изучение изменчивости вещественного состава и стереометрических особенностей руд в геологическом пространстве исключительно важно для решения проблем рационального использования рудных месторождений и прогнозирования экологических последствий их освоения. При оценке воздействия на окружающую среду месторождений, вовлекаемых в разведку и эксплуатацию, должны приниматься во внимание как закономерности распределения токсичных элементов и минералов в объемах рудных тел и полей, так и ландшафтно-геохимические условия, определяющие факторы миграции и накопления этих компонентов после их извлечения на земную поверхность. Для геолого-экономического и экологического прогнозирования необходимо накопление материалов по распределению примесных элементов, иногда не играющих роли при оценке промышленной важности месторождений, но приводящих к возникновению различных техногенных геохимических аномалий в районах геолого-разведочных и добычных работ, а также образованию техногенных месторождений в местах хранения отходов обогатительных фабрик и металлургических комбинатов.

The main subjects of inquiry are noble and nonferrous metal deposits of the Urals, Siberia and Novaya Zemlya. It is shown that the determination of the chemical elements distribution mineral balance in ore, the study of material structure variability and stereo metric peculiarities of ore in the geological sphere are extremely important to solve the problems connected with the rational use of ore deposits and forecasting ecological consequences of mining. The evaluation of an ecological impact of the deposits under exploration and service, regularities in the distribution of toxic elements in ore bodies and fields should be considered as well as landscape and geochemical conditions which determine migration factors and accumulation of the abovementioned components after extraction.

In order to suit geological, economic and ecological forecasting purposes, it is necessary to accumulate trace elements distribution data as well as materials dealing with the formation of technogenic deposits in places of the concentration and metallurgical plants waste storage.

На основе онтогенического анализа минеральных индивидов и агрегатов проведены исследования ряда месторождений благородных и цветных металлов Урала, Сибири и Новой Земли для решения проблем рационального использования минерального сырья и охраны природной среды. Особое внимание обращено на выявление закономерностей изменчивости минеральных индивидов и агрегатов в различных типах рудных месторождений, а также компьютерное моделирование рудных агрегатов. Под изменчивостью минерализации мы понимаем непостоянство состава и свойств минеральных индивидов и агрегатов, являющееся следствием меняющихся условий среды и внутренних факторов самоорганизации вещества. Особенности конституции и соответственно свойств минералов рудных месторождений зависят от многочисленных факторов, определяющих условия зарождения и «жизни» минералов в конкретных блоках земной коры. Общая изменчивость конституции минералов отражает их фило- и онтогеническое развитие. Изменчивость химизма минеральных индивидов при этом выступает как интегральная функция факторов, действовавших на этапах зарождения, жизни и гибели минерала в конкретной обстановке рудообразования.

В реальных условиях геолого-экономическое и экологическое прогнозирование осложняется резким дефицитом материалов, систематизирующих минералого-геохимические данные не только по ведущим рудным компонентам, но и по примесным элементам. Недооценка сложности состава и условий размещения различных минеральных и геохимических ассоциаций на рудных месторождениях ведет к потере в процессе эксплуатации значительных масс ценных компонентов и поступлению в окружающую среду потоков токсичных элементов, которые приводят к резкому и быстрому изменению геохимической обстановки в горнорудных районах. Одной из важных проблем, которая может решаться на стадиях поисково-оценочных и разведочных работ, является выявление форм нахождения и подсчет объемов всех компонентов руд и околорудных образований, в том числе и наиболее токсичных, извлекаемых на поверхность при различных схемах освоения месторождений. Без подобных расчетов и оценки технологических свойств руд невозможны оптимизация схемы извлечения полезных компонентов из руды, корректная экологическая оценка воздействия горнопромышленных предприятий на окружающую среду, а в связи с этим определение комплексности и оценка целесообразности освоения месторождений. Поясним это на ряде примеров.

Золотополиметаллические рудопроявления Лемвинской площади Полярного Урала, одной из малоизученных перспективных территорий Севера Урала, представлены серией несущих повышенное (до 21 г/т) содержание золота зон окварцевания. Золотоносные зоны представлены сульфидной минерализацией преимущественно пирит-халькопирит-галенит-сфалеритового состава. В разных рудопроявлениях содержания сульфидов неодинаковы, однако, среднее содержание пирита составляет 2-5 %, содержания галенита, сфалерита и халькопирита незначительны (доли процента). Преобладает микро-тонкозернистый пирит-1, он представлен идиоморфными кубическими кристаллами размером 0,01-0,2 мм, содержащими, в основном, включения халькопирита, и относительно равномерно распределен по всей массе породы. Более крупный пирит-2 имеет размеры зерен до 2-3 мм и агрегатных сростков до 6 мм. Ядра таких зерен чистые, а по периферии наблюдаются располагающиеся по зонам роста включения тонкозернистых халькопирита, галенита, сфалерита. Пирит-1, вероятно, возник в процессе диагенеза первичных осадков, в то время как пирит-2 связан с более поздними гидротермальными процессами и отлагался совместно с галенитом, сфалеритом, халькопиритом. Формирование золотоносных зон, вероятно, происходило в два этапа. На первом, гидротермально-осадочном, произошла первичная концентрация рудных компонентов, на втором, плутоногенно-метаморфическом, их перераспределение и окончательная локализация.

Результаты исследований содержаний элементов-примесей в основных разновидностях пород и руд площади были обработаны методом главных компонент факторного анализа. В координатах первого и второго факторов отчетливо выделились три поля, соответствующих трем основным геохимическим ассоциациям:

- золотосульфидной (халькофильной), включающей элементы Zn, Mo, Cu, Ag, Sr, Pb, Au;
- редкометальной (литофильной) с Be, Ga, Y, Ba, Zr;
- «мафической» (сидерофильной) ассоциации (Mn, Ti, Sc, Co, V, Cr, Ni).

Это свидетельствует о тесной связи золота и сульфидных минералов, что может являться следствием примесной природы золота в сульфидах (пирите, галените и др.) или синхронного образования золота и сульфидных минералов.

Характерным примером комплексных руд является месторождение золота Олимпиада (Енисейский кряж). Оруденение золотосульфидного типа несет комплексную Au-Sb-W-минерализацию. На месторождении присутствуют первичные и окисленные руды. Детальные минералого-геохимические исследования первичных руд показывают длительную историю их формирования, разнообразие форм нахождения золота и попутных компонентов в рудах (табл.1).

Таблица 1

Формы нахождения золота, сурьмы и вольфрама в первичных рудах месторождения Олимпиада

Стадия	Тип руд	Формы нахождения			
		Золото		Сурьма	Вольфрам
		свободное	химически связанное		
Золотосульфидная	Вкрапленные	Золото	Арсенопирит (до 0,63 % Au по массе)	–	Шеелит
Золотополиметаллическая	Прожилковые	Hg-золото	–	Бертьерит, гудмундит, ульманит, джемсонит	–
Золотоантимонитовая	– « –	Электрум	Аурostибит	Антимонит, самородная сурьма	–

Наиболее распространены вкрапленные руды, имеющие площадное распространение. Они содержат тонкую (1-500 мкм) вкрапленность минералов золотосульфидной стадии (арсенопирит, пирротин, пирит, шеелит). Содержание сульфидов составляет 2-5 %. Самородное золото изредка встречается в сростках с арсенопиритом. Большая часть Au находится в химически связанном состоянии в арсенопирите [3]. Минерализация золотополиметаллической и золотоантимонитовой стадий слагает системы секущих кварцевых жил и прожилков во вкрапленных рудах. Минеральный состав таких образований разнообразен и включает сульфиды и сульфоантимониды железа, свинца, меди цинка, теллуриды висмута и ртути. Самородное золото-2 часто содержит заметную примесь Hg и встречается совместно с бертьеритом и джемсонитом. В ассоциации с антимонитом присутствует электрум и аурostибит. Распределение минералов Au в прожилковых рудах неравномерное, преобладают гнездообразные скопления.

Результаты пробирного и полуколичественного спектрального анализов руд на Au и элементы-примеси обработаны с помощью факторного анализа методом главных компонент. На диаграмме факторных нагрузок обособляются ассоциации элементов, характерных для рудоносных метасоматитов и вмещающих пород. В контурах рудных тел происходит слабое накопление элементов, связанных с незначительно проявленным редкометальным оруденением, и резкое – ассоциирующих с Au. Различия

минерального состава прожилковых и вкрапленных руд позволяет установить закономерности их пространственного распределения методом полиэлементного геохимического картирования. Геометризация значений факторов, отвечающих Au-As- и Sb-Pb-Ag±Au-геохимическим ассоциациям, методом построения карт в изолиниях дает четкие, практически не накладывающиеся ореолы развития того или иного типа руд.

При изучении зоны гипергенеза Павловского месторождения (Новая Земля) исследовались особенности миграции Pb, Zn и Cd при окислении первичных сульфидных свинцово-цинковых руд, а также минеральный состав окисленных руд. Зона окисления развита на малую глубину и имеет мощность не более 3 м (максимум размерзания в летний сезон). Среди новообразованных минералов распространены ярозиты, гетит, гипс (K, Na, Pb), гораздо реже встречаются копиапит, мелантерит, фиброферрит, смитсонит, церуссит и др. Ранние железосодержащие минералы, водорастворимые сульфаты: копиапит, Zn-копиапит, фиброферрит, мелантерит – образуются при повышении концентрации сульфатных растворов, промежуточные (минералы группы ярозита) возникают в условиях кислых вод (pH < 3) и высокого окислительного потенциала. Образование поздних оксидов и гидроксидов железа происходит в широких пределах кислотности (pH > 5) растворов при окислении Fe^{2+} и гидролизе соединений Fe^{3+}.

Цинк – один из наиболее подвижных элементов в условиях зоны окисления. Сульфат $ZnSO_4$ не гидролизуется, не окисляется и не восстанавливается. Из зоны окисления Zn выносится за пределы месторождения и чаще рассеивается, но иногда может осаждаться в виде карбонатов или силикатов. Поведение Cd в зоне гипергенеза очень близко к поведению Zn, но Cd как более основный элемент имеет более низкие окислительный потенциал и энергетические характеристики, обусловливающие более быстрый выход иона Cd из решетки сфалерита [2]. В сернокислой среде до pH < 8 Cd мигрирует в виде Cd^{2+}, при pH = 9 в виде $CdSO_4^{\circ}$ и $Cd(OH)^{+}$ [1]; незначительная часть Cd может образовывать комплексы с органическим веществом и мигрировать в таком виде. Свинец на первых же стадиях гипергенеза образует труднорастворимые соединения и является одним из наименее подвижных элементов сульфидных руд. Из собственных гипергенных минералов Pb отмечаются плюмбоярозит, редко англезит, церуссит, элиит и бедантит.

Таблица 2

Распределение элементов по данным фазового химического анализа, % по массе (аналитик С.Н.Зимина, «Механобр-аналит»)

Проба	Zn			Cd		Pb		
	Сульфат	Карбонат	Общий	Сульфат	Общий	Сульфат + карбонат	Pb-ярозит	Общий
1	0,09	0,07	0,55	0,0002	0,0074	0,022	1,98	2,012
2	0,028	0,017	0,1	< 0,0001	0,0013	0,002	0,16	0,282
3	< 0,001	0,019	0,1	< 0,0001	0,0008	0,005	0,015	0,022
4	< 0,001	0,13	0,51	< 0,0001	0,0018	< 0,001	0,5	0,558
5	< 0,001	0,05	0,1	< 0,0001	0,0013	0,67	0,6	1,85
6	0,04	0,08	0,14	0,0003	0,0030	< 0,001	0,032	0,039
7	0,02	0,45	0,7	0,0001	0,0048	0,02	0,23	0,32
8	0,002	0,78	0,86	< 0,0001	0,0058	0,001	0,26	0,271

Примечание. 1 – окисленные сплошные руды; 2 и 3 – разложенные нерудные прожилки в сплошных рудах; 4 – железная шляпа; 5 – метасоматически измененная порода; 6 и 7 – глиноподобные образования по вкрапленным руд; 8 – корка вторичных минералов по вкрапленным рудам.

Для выяснения возможности миграции Zn, Cd и Pb был проведен химический анализ, с помощью которого выделены растворимые в воде сульфатные формы для Zn и Cd; нерастворимые карбонатные для Pb, Zn и Cd и сульфатные для Pb (табл.2). Коэффициент «выноса» ($K = C_{исх}/C_{окисл}$) для этих элементов, как и ожидалось, оказался различным: $K_{Zn} = 21{,}3$; $K_{Cd} = 30{,}3$; $K_{Pb} = 5{,}4$. Гидрогеохимические исследования показали, что содержания тяжелых металлов в водотоках на месторождении очень значительны, например, в ручье Ржавый, пересекающем рудные тела, концентрации Zn, Pb и Cd в воде достигают соответственно 13000, 42 и 14 мкг/л. В застойных областях в районе Рудного обрыва зафиксированы ураганные содержания: 425,3 г/л Zn, 700 мкг/л Pb и 450 мкг/л Cd. Примерно подсчитан вынос тяжелых металлов с Безымяннинского рудного узла в год: для цинка 28-30 т, свинца 3-4 т, кадмия 0,7-0,8 т [4]. Следовательно, хотя зона окисления Павловского месторождения имеет малую мощность, она участвует в образовании вторичного ореола рассеяния тяжелых металлов и существенно влияет на экологическую обстановку в регионе. Значительный вынос Zn, Cd и отчасти Pb может обусловить образование вторичных залежей этих элементов на геохимическом барьере река – море.

Гайское месторождение является типичным представителем колчеданных месторождений уральского типа. Главными минеральными асссоциациями здесь являются серноколчеданные (ранние), халькопирит-пиритовая, халькопирит-сфалерит-пириовая и борнит-полиметаллическая (продуктивные) и кварц-барит-карбонатные с сульфидами или безсульфидные (поздние). Для всех главных рудных минералов при переходе от ранних генераций к поздним установлены увеличение размеров и идиоморфизма зерен, закономерное очищение от изоморфных примесей, увеличение микротвердости (при уменьшении коэффициента ее вариации) и коэффициента отражения, что свидетельствует о своеобразном совершенствовании конституции минералов.

Благородно-метальная минерализация отмечена во всех типах руд. Золото присутствует в тонкодисперсной форме в раннем пирите и в видимой в более поздних медно-полиметаллических ассоциациях, причем его содержание возрастает в 10 раз от ранних руд к поздним. В то же время содержание Au в виде примеси в минералах падает, а доля самородного золота возрастает, что обусловлено метаморфическим перераспределением вещества. Самостоятельных минералов Ag не обнаружено. Обогащение руд Ag, как и золотом происходит аналогично: от ранних руд к поздним, от нескольких граммов на тонну в пиритовых рудах до нескольких сотен в халькопирит-борнитовых. В поздних ассоциациях в качестве минералов концентраторов Ag выступают галенит, теннантит и борнит. В борните при прокаливании появляются мелкие (до 5-0 мкм) выделения самородного серебра. Содержания элементов платиновой группы в рудах низкие (0,02-0,05 г/т) и слабо возрастают по мере обогащения руд медью. Установлены минералы-концентраторы платиноидов: самородное золото (10-21,7 г/т Pt и 43,4-44,2 г/т Pd) и борнит (0,37 г/т Pt и 0,02 г/т Pd).

В ходе обогащения руды происходит сильное переизмельчение и ошламование полезных минералов (халькопирита, сфалерита, борнита) при одновременном недораскрытии их сростков с пиритом, что ведет к ухудшению технологических показателей. Раздельное обогащение руд различных типов позволит учесть их особенности на всех стадиях рудоподготовки и обогащения. Повышение качества медной «головки» и медного концентрата возможно при удалении свободных зерен пирита и сфалерита флотационной крупности +10 мкм. Повышение извлечения цинка на фабрике возможно при выделении свободных зерен сфалерита флотационной крупности из медного концентрата и хвостов, но только при разработке более эффективной технологии разделения халькопирита и сфалерита.

Большое значение для оценки технологических свойств руд имеют морфологические особенности минеральных индивидов. Очевидно, что дезинтеграция минерального агрегата по границам индивидов контролируется прочностью срастания последних.

Понятно также, что энергия «отрыва» зерна от зерна не может быть больше, чем энергия их срастания. Отсюда следует, что технологические свойства агрегата (разрушение на составные части) и слагающих его индивидов (флотируемость) определяются условиями формирования минеральных индивидов и агрегатов. Для того, чтобы оценить характер дезинтеграции минеральных агрегатов, необходимо осуществить онтогенический и стереометрический для получения количественной меры структурных параметров анализы исследуемых агрегатов руд [1]. Изменчивость межзеренных границ минералов изучалась с применением морфометрического анализа на базе компьютерного видеоанализатора, использующего в качестве входного устройства поляризационный микроскоп «Opton Axioplan», оснащенный цифровой камерой высокого разрешения. В основу описания межзеренных границ агрегатов положены методы численного моделирования сложных кривых, использующие подходы фрактальной геометрии и гармонического анализа. В рамках первого подхода для всех изученных индивидов рассчитываются значения фрактальной размерности межзеренных границ как универсальной меры их извилистости (шероховатости, сутурности). Найденные числовые параметры использованы для процедуры дискриминации руд по геологическим признакам.

С помощью преобразования Фурье определяются амплитуды и дисперсии гармоник, несущих информацию об относительном вкладе сигналов разных масштабов (частот) в строение минеральных контуров. Для заданных масштабных уровней рассчитываются коэффициенты сутурности (по Эрлиху) и оценивается влияние геологических факторов на форму зерен. В сравнении с фрактальной моделью вариации фурье-дескрипторов менее чувствительны к изменению формы и в большей степени подвержены влиянию случайных причин. Тем не менее, обе группы структурных характеристик отражают весьма тонкие морфологические различия в строении агрегатов и, при условии статистической представительности выборок, могут служить критериями условий минералообразования и использоваться для выделения технологических типов руд. Итак, морфометрический анализ строения рудных агрегатов позволяет разработать онтогеническую модель их структуры, провести корреляцию между онтогенезом агрегата, с одной стороны, и стереометрическими характеристиками границ срастания минеральных зерен, с другой, и тем самым помочь технологам оптимизировать схему извлечения полезных компонентов из руды и рудных концентратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бродская Р.Л.* Проблемы моделирования внутреннего строения упорядоченных и равновесных минералого-петрографических систем / Р.Л.Бродская, Ю.Б.Марин // Записки ВМО. 2001. Вып.6. С.1-15.

2. *Губина Т.А.* Изменчивость состава и морфологии сфалерита из полиметаллических проявлений Новой Земли // Записки ВМО. 2000. Вып.2. С.59-64.

3. Золотые руды месторождения Олимпиада (Енисейский кряж, Сибирь) / А.Д.Генкин, В.А.Лопатин, Р.А.Савельев, Ю.Г.Сафонов, Н.Б.Сергеев, А.Л.Керзин, А.И.Цепин, Х.Амшутц, З.Б.Афанасьева, Ф.Вагнер, Г.Ф.Иванова // Геология рудных месторождений. 1994. Т.3. № 2. С.111-136.

4. *Иванов Г.И.* Миграция токсичных элементов в системе месторождение-река-залив-море / Г.И.Иванов, А.П.Каленич, А.В.Ласточкин // Вековые изменения морских экосистем Арктики / Климат, морской перигляциал, биопродуктивность / КНЦ РАН. Апатиты, 2001. С.203-221.