

## Литература

- Богатиков О. А.* Петрология и металлогения габбро-сиенитовых комплексов Алтае-Саянской области. М.: Наука, 1966. 240 с.
- Гордиенко И. В., Андреев Г. В., Кузнецов А. Н.* Магматические формации палеозоя Саяно-Байкальской горной области. М.: Наука, 1978. 220 с.
- Смирнов С. М., Перельгина А. И.* О некоторых основных чертах строения и рудоносности массивов основных и средних пород в хребте Моностой (Бурятская АССР) // Изв. высш. учебн. завед. Геология и разведка, 1959. № 6. С. 3–12.
- Ariskin A. A.* The compositional evolution of differentiated liquids from the Skaergaard Layered Series as determined by geochemical thermometry // Russian Journal of Earth Sciences, 2003. Vol. 5. № 1. P. 1–29.
- Badmatsyrenova R. A., Orsoev D. A.* Geochemical features of titanomagnetite-ilmenite mineralization in the Arsenyev massif (Transbaikalia) // Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003. V. 67. № 18 (S1). P. 31.
- Nimis P.* Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic and acid, tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems // Contribution to Mineralogy and Petrology, 1999. Vol. 135. P. 62–74.
- Roeder P. L., Emslie R. F.* Olivine-liquid equilibrium // Contribution to Mineralogy and Petrology, 1970. Vol. 29. P. 275–289.

*Н. Т. Каменихин*

*Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс*

### **Геохимическая модель гидротермального оруденения для решения теоретических и прикладных задач**

Использование моделей рудных месторождений для решения различных геологических задач получило широкое распространение в конце 70-х годов прошлого века [Кривцов, 1989]. Основной целью моделирования служило создание обобщенных образов объектов исследования и выявление на них закономерностей в поведении представительных признаков. Методы моделирования всецело зависят от назначения моделей и способов их интерпретации применительно к природным объектам. При геохимических исследованиях одним из важнейших представительных признаков гидротермальных рудных месторождений, интрузивных и метаморфических образований является зональность химических элементов, ставшая за длительный период изучения аксиомой. На базе представлений о зональности могут быть решены многие вопросы теоретического и прикладного плана. Это может быть показано на примере гидротермального рудообразования.

**Модель геохимической зональности.** С целью максимального аппроксимирования геохимической модели к природной закономерности, воспользуемся рядами осевой зональности элементов-индикаторов различных рудных месторождений [Справочник..., 1990, табл. 58]. Так, низкотемпературные (эпитеральные) золоторудные месторождения обладают следующим рядом осевой зональности (сверху вниз), одновременно присвоим элементам порядковые номера: 1 – Hg, 2 – Ba, 3 – (Sb, As), 4 – (Ag, Au), 5 – Pb, 6 – (Zn, Cu), 7 – (Mo, Sn, Bi, W). Взаимоотношения элемен-

тов, заключенных в скобки, в ряду не всегда могут быть установлены. Каждый элемент или группа сближенных элементов в скобках характеризует конкретный уровень или ярус. Присвоим элементам под номерами названия, соответствующие расположению ярусов, относительно рудного тела (интервала): 1 – отдаленно-надрудный, 2 – надрудный, 3 – погранично-надрудный, 4 – рудный, 5 – погранично-подрудный, 6 – подрудный, 7 – отдаленно-подрудный. Эти элементы назовем элементами зональности, поскольку они фиксируют ярусы рудовмещающей геохимической структуры.

На 21 тип рудных месторождений [Справочник..., 1990, табл. 58] приходится 150 ярусов, что в среднем составляет 7 ярусов на один тип. Число ярусов для разных месторождений может отличаться и значительно превышать число 7. Однако для прикладных целей 7 ярусов оптимально. Они представлены тремя надрудными, одним рудным и тремя подрудными элементами или группами сближенных элементов, заключенных в скобки. Зональность, как один из представительных признаков рудных месторождений, есть последовательная смена по падению оруденения концентраций одних элементов другими с некоторым шагом, характеризующим мощность ярусов. Этот основополагающий принцип положим в основу геохимической модели зональности рудовмещающей структуры и представим его в виде графиков распределения семи элементов зональности по падению (рис. 1, графа «Зональность оруденения»). Это и будет моделью геохимической зональности оруденения.

Для выявления на модели предсказательных свойств, следует применить некоторые методы математической статистики. На один из них обратили внимание А. А. Беус и С. В. Григорян [Беус, 1975]. Они полагают, что «существенный интерес представляет использование изменения характера корреляционной связи между элементами в пределах эндогенных ореолов для оценки глубины эрозионного среза рудного тела. Применение подобных критериев в ближайшем будущем, несомненно, позволит однозначно оценивать перспективы вновь открываемых месторождений и рационально направлять геологоразведочные работы на наиболее интересные объекты». Предвидение осталось нереализованным. Одним из вариантов решения данной задачи является представленная методика определения уровня среза, ряда элементов зональности и мощности ярусов оруденения.

**Модель парной корреляции.** На геохимической модели (рис. 1, графа «Зональность оруденения») визуально выполним парную корреляцию между всеми элементами (рис. 1, графа «Коррелируемые элементы»). В связи с тем, что для определения парагенетических ассоциаций элементов используется положительное поле корреляционной матрицы, для нахождения ряда элементов зональности, уровня эрозионного среза и мощности (границ) ярусов – отрицательное поле. Свойства корреляционных связей элементов зональности вытекают из модели, особенно, когда корреляционные связи представлены графиками коэффициентов парной корреляции (правая часть рис. 1). Свойства лежат в основе определения искомых параметров.

**Технология.** Отбор «кустовым» способом необходимого для корреляционного анализа количества проб из однородного материала. Полуколичественный спектральный анализ проб (лучше количественный) на 17–30 элементов. Вычисление коэффициентов парной корреляции. На отдельном листе выписывают около каждого элемента все элементы, связанные с ним отрицательно. Если имел место рудообразующий процесс, то должна проявиться зональность. Она выражается тем, что все элементы разделятся на две группы: элементы зональности и элементы, не имеющие отношения к зональности, неустойчивые. Первая группа разделится на две подгруппы,



имеющие между собой отрицательные связи, а внутри подгрупп – связи положительные. Сочетание коэффициентов парной корреляции в каждом отдельно взятом ярусе неповторимо (рис. 1). На этом основании точно определяется ярус, из которого взята выборка проб. Для гарантированной уверенности в правильности определения яруса оруденения следует обратиться к модели ранжированных рядов элементов зональности.

**Модель ранжированных рядов** по убыванию концентрации элементов зональности (рис. 2) строится на той же геохимической модели зональности рудовмещающей структуры путем считывания последовательности расположения элементов зональности на графиках в однотипных интервалах по падению структуры. Вместо восьми ярусов по парной корреляции, ранжированными рядами определяется 13 ярусов, которые стыкуются, дублируют и детализируют ярусы парной корреляции. Формулы ранжированных рядов в ярусах оруденения индивидуальны и не повторяются. На этом основано определение ярусов по ранжированным рядам.

**Технология.** Средние содержания элементов в выборке проб, по которой вычислялись коэффициенты парной корреляции, нормируются к кларкам или к субкларкам. Под последними автор понимает средние содержания химических элементов в главных типах магматических пород. Использование местного геохимического фона недопустимо. Все проанализированные элементы выписываются в ранжированный ряд по убыванию значений кларков концентрации или субкларков концентрации. Элементы зональности, выявленные корреляционным анализом, выписываются из суммарного ранжированного ряда в ранговой последовательности и совмещаются с формулами ранжированных рядов (рис. 2, графа «Формулы ранжированных рядов...»). Согласно формул ранжированных рядов, элементам присваиваются номера, которые определяют ряд элементов зональности для данного объекта. По гипсометрической шкале определяется мощность ярусов.

Преимущество данной методики заключается в возможности определения уровня (яруса) эрозионного среза по выборке проб из одного сечения (с поверхности) на ранних стадиях изучения вновь открываемых объектов и при переоценке проблемных объектов. В то же время, методика применима на всех стадиях поисковых и разведочных работ.

Все интрузивные и метаморфические комплексы, потенциально обладающие зональностью, могут быть исследованы этим методом. Приведенные модели показали, что корреляционные связи и ранжированные ряды зависят от принадлежности к ярусу, из которого были отобраны пробы на исследования. Часте выводы по сопоставлению различий пород по этим критериям не корректны, поскольку пробы могли быть отобраны из разных ярусов. Для решения теоретических и прикладных задач модели создают широкое поле деятельности. Время раскрытия потенциальных возможностей моделей еще впереди. Залогом этому является оптимистическое высказывание А. А. Беуса и С. В. Григоряна [Беус, 1975].

### Литература

- Кривцов А. И.* Модели рудных месторождений. М., 1989. 65 с.  
Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / Под редакцией А. П. Соловова. М.: Недра, 1990. 336 с.  
*Беус А. А.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Недра, 1975. 280 с.