

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ РУДООБРАЗОВАНИЯ

**Чудненко<sup>1</sup> К.В., Кравцова<sup>1</sup> Р.Г., Пальянова<sup>2</sup> Г.А.**

<sup>1</sup>*Институт геохимии им. А.П.Виноградова СО РАН, г. Иркутск, e-mail: chud@igc.irk.ru*

<sup>2</sup>*Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: palyan@igm.nsc.ru*

Невозможность создания одной «на все случаи» универсальной модели формирования и развития гидротермальных систем связано с уникальностью каждого природного объекта, с присущим только ему индивидуальным набором характеристик и параметров геохимических процессов. В то же время статистические и динамические параметры гидротермальных систем не могут быть отнесены к разряду случайных величин. Размеры магматических камер, глубина их залегания, объёмное распределение температур и давлений в интрузии и в надинтрузивном пространстве, скорости нагревания и остывания, время существования флюидопотоков в конвективной стадии магматического очага и в стадии стационарной дегазации после прекращения в нём конвекции, временные и пространственные изменения температурного поля, ресурсы флюидов в глубинных источниках, интенсивность нисходящих потоков инфильтрационных метеорных вод, время существования гидротермальных систем, – все эти и другие величины имеют, если не «точечные», то, по крайней мере, интервальные оценки, которые последовательно уточняются как по мере обобщения и систематизации геологического опыта, так и по результатам численного моделирования процессов тепло- и массопереноса.

Исходя из основополагающего тезиса о геологической детерминированности рудообразующих процессов, можно с уверенностью прогнозировать, что с помощью теоретических построений с привлечением современных средств исследования в конечном итоге удастся воссоздать эволюцию конкретных эндогенных флюидных систем с момента их зарождения и до полного угасания, с высокой надёжностью рассчитать потенциальную рудоносность месторождений. Проблема чрезвычайно сложна, а природа гидротермальных систем слишком изменчива и разнообразна. Поэтому именно построение количественной теории эндогенных флюидных систем является тем перспективным направлением, в рамках которого успешно трудятся многие отечественные и зарубежные исследователи.

В основе такого подхода, как правило, лежит разработка количественных схем эволюции конечного числа базовых структурно-динамических типов флюидно-магматических систем с моделями тех процессов, которые управляют растворением, переносом и отложением рудных и петрогенных элементов. Таким образом, может быть построена сеть опорных моделей – несущий каркас теории эндогенных флюидных систем [Шарапов, 1992]. Применение композиционного подхода позволяет выделить в конкретных задачах гидротермального рудообразования стандартную часть, которую можно рассмотреть с помощью опорных моделей, уже готовых алгоритмов, вычислительных схем и программ, и нестандартную, связанную со спецификой геологического объекта, что позволит с помощью уже наработанных схем, алгоритмов и процедур реконструировать как общий характер, так и особенности эволюции конкретной гидротермальной системы.

Большое значение в осуществлении и развитии этого направления по праву принадлежит имитационному моделированию [Карпов, 1981]. Наряду и вместе с качественными геолого-геохимическими построениями, аналитическими и численными решениями задач тепло- и массопереноса, имитационное моделирование оказывается единственно пригодным средством исследования характерных особенностей гидротермальных систем в физико-химическом процессе их становления, развития и угасания. Принципиальным здесь является следующее обстоятельство. Если стремиться к наиболее полному, *доступному уже сейчас*, уровню физико-химического представления природных процессов, то даже в сравнительно простых моделях с участием водных (флюидных) растворов электролитов неизбежно приходится значительно увеличивать список

индивидуальных веществ (зависимых компонентов в смысле Дж. Гиббса) в исходной мультисистеме. Имеются в виду представительные и непрерывно расширяющиеся базы термодинамических данных по зависимым компонентам водных (флюидных) растворов электролитов на основе модифицированного уравнения состояния НКФ [Helgeson et al., 1981]. Список веществ потенциально возможных в равновесии становится ещё более обширным, если одновременно с водным раствором может присутствовать и газовая смесь. Здесь «волевое» сокращение и усечение исходного списка приводит к потере самого главного – физико-химического содержания модели. На практике выбор не так уж разнообразен: или ограничиться гидродинамической моделью в рамках технической термодинамики или совместить и согласовать модели тепло- и массопереноса с физико-химическими моделями взаимодействия [Шарапов, 2005; Чудненко, 2010]. Отдельные приёмы имитационных методов моделирования физико-химических процессов рудообразования на основе формализма стехиометрических уравнений реакций и констант равновесия использовались в работах [Drummond, Ohmoto, 1985; Krupp, Seward, 1990]. Применение методов минимизации свободной энергии существенно расширило возможности модельного воспроизведения реальных условий, не прибегая к значительной физико-химической редукции входных данных, что неизбежно приходится делать с моделями, формируемыми «по реакциям» [Борисов, 2000; Кравцова, 2010]

Остановимся на базовых положениях, которые должны быть положены в основу формирования имитационной модели гидротермальной системы с участием минералов, водного раствора электролита и газовой фазы, с совокупностью резервуаров, связанных между собой и внешней средой потоками подвижных групп фаз [Чудненко, 2010], с помощью которой могут ставиться и решаться задачи исследования физико-химической эволюции гидротермальной системы во времени и пространстве. Прежде всего, подразумевается, что исследователь, поставивший перед собой цель построения количественной физико-химической модели, должен в доскональности знать моделируемый геологический объект, включая химический и минералогический состав жильных тел и вмещающих пород, термобарометрические условия формирования руд, а также иметь одну или несколько альтернативных гипотез относительно возможности протекания процесса рудообразования. Такие знания будут незаменимы как на этапе формирования модели и проведения численных экспериментов, позволяя определять начальные условия и ограничения, выделять резервуары и потоки, связывающие их в единую динамическую мегасистему, задавать возможные сценарии протекания процессов, так и при анализе результатов имитационного моделирования.

В качестве примера рассмотрим несколько «предельных» сценариев возможного развития процессов растворения, переноса и отложения рудных компонентов в рамках тех допущений и ограничений, которые обычно присущи большинству процессов гидротермального рудообразования:

- 1) Подъём глубинного флюида, образованного в результате термодинамически равновесного взаимодействия «магматические породы - вода» в подрудной зоне. Составы возможных исходных флюидов, формирующихся в подрудной зоне в условиях термодинамического равновесия с магматическими породами могут варьироваться в зависимости от различных содержаний  $H_2O$  и, следовательно, с различным соотношением порода/вода ( $R/W$ ).

Модель по первому сценарию позволяет определить потенциальную возможность переноса и отложения рудных компонентов из глубинного флюида только за счёт последовательного понижения температуры и давления, которое, в нашем случае, по всему геотермобарометрическому маршруту остаётся выше давления насыщения  $H_2O$ . Такой сценарий возможен в реальных условиях, когда глубинный флюид поднимается снизу-вверх по высокопроницаемым зонам с незначительным химическим взаимодействием с вмещающими породами. По-видимому, свободный проход флюида маловероятен на ранних, начальных стадиях существования гидротермальной мегасистемы, когда подсистема флюида

и подсистема вмещающей породы термодинамически несовместимы. Но в дальнейшем флюидопоток приходит в состояние, близкое к термодинамическому равновесию с провзаимодействовавшей породой, и первый сценарий, который может быть представлен моделью свободного течения флюида по хорошо проницаемым проточным каналам, становится вполне возможным. Особенно, в открытых трещинах в приповерхностных зонах.

2) Модель дегазации. Глубинный флюид из корневой зоны стягивания гидротерм проникает по стволу трещиноватой зоне в проточном режиме по геобаротерме без взаимодействия с вмещающими породами. Обычно в интервале 100-200°C в приповерхностных условиях давление падает до давления насыщения  $H_2O$ , что приводит к выкипанию гидротермального раствора.

3) Модель смешения с метеорной водой. Эндогенный флюид движется вверх по геобаротерме и, дополнительно происходит смешивание с метеорными водами, насыщенными кислородом атмосферы. Смешение происходит без взаимодействия с вмещающими породами. В результате смешивания метеорных вод с глубинным флюидом происходит понижение  $pH$ , повышение  $Eh$  и выпадение ряда рудных компонентов.

4) Модель взаимодействия глубинного флюида с вмещающими породами. Глубинный флюид, проходящий через стволу трещиноватую зону по геобаротерме, взаимодействует с магматическими породами по схеме последовательного проточного реактора.

5) Инфильтрационная модель. Инфильтрация метеорных вод в нижние горизонты и учет их влияния на всех этапах моделирования восходящего флюида по стволу каналу в зону разгрузки за счет вторичного обогащения гидротермальных растворов рудными компонентами.

Дальнейшее усложнение моделей может быть связано с учетом в постановке задачи замкнутых и открытых круговоротов гидротермальных потоков. Возможен и целый ряд других сценариев.

Продолжительность существования отдельных минералогических зон и скорости истечения, фильтрации и инфильтрации потоков водных растворов, не являющиеся независимыми переменными в химической термодинамике, вводятся в схему динамической модели посредством задания макроскопических коэффициентов переноса подвижных фаз или индивидуальных компонентов и введением временной координаты, позволяющей моделировать последовательное воздействие гидротермального раствора на породы, когда вторичные минералы, образованные на предыдущем цикле, участвуют во взаимодействии с раствором следующего цикла.

Основополагающие принципы моделирования процессов рудообразования использованы нами при исследовании золото-серебряных рудно-магматических систем и связанных с ними месторождений в центральной части Охотско-Чукотского вулканического пояса [Карпов и др., 2001; Кравцова, 2010]. Моделирование проводилось с помощью программного комплекса «Селектор» [Чудненко, 2010].

Многорезервуарная термодинамическая модель вулканогенно-гидротермальной рудообразующей системы эпитептермальных Au-Ag месторождений в условиях, типичных для активной континентальной окраины, была рассмотрена в рамках различных альтернативных сценариев. В модели, наиболее полно отвечающей реальным вулканогенно-гидротермальным месторождениям Северного Приохотья, предполагалось, что водосодержащие флюиды образуются в результате взаимодействия системы «андезит-вода» в зоне аккумуляции гидротермальных растворов периферических магматических очагов. Содержащиеся в андезитах на кларковом уровне Au и Ag мобилизуются во флюидную фазу с фактором обогащенности в 100-200 раз. В приповерхностной зоне разгрузки происходит разбавление гидротермального раствора метеорными водами в пропорции 10:1 – 60:1, что приводит к окислению сульфидной серы в комплексе  $Au(HS)_2^-$ , повышению  $Eh$ , понижению  $pH$ , и, как следствие, выпадению чистого Au (более 96%).

Имитационными экспериментами установлено, что все изученные нами Au-Ag руды сформировались на глубине 500-1000 м от поверхности, при общей протяженности гидротермальной постройки не более 1.5 км, в диапазоне температур 300-150°C.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-05-00214а) и СО РАН (проект № 48).*

## Литература

Борисов М.В. Геохимические и термодинамические модели жильного гидротермального рудообразования // М.: Научный мир, 2000. – 360 с.

Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. – 247 с.

Карпов И.К., Чудненко К.В., Кравцова Р.Г., Бычинский В.А. Имитационное моделирование физико-химических процессов растворения, переноса и отложения золота в эпитептермальных золото-серебряных месторождениях Северо-Востока России // Геология и геофизика, 2001. Т. 42, № 3. С. 393-408.

Кравцова Р.Г. Геохимия и условия формирования золото-серебряных рудообразующих систем Северного Приохотья. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. – 292 с.

Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. – 287 с.

Шарапов В.Н. Развитие эндогенных флюидных рудообразующих систем. Новосибирск, Наука, Сибирское отделение, 1992, – 144 с.

Шарапов В.Н. Динамика развития надстеносферных флюидных систем // Геология и геофизика, 2005. Т. 46. № 5. С. 459-470.

Drummond S.E., and Ohmoto H. Chemical Evolution and Mineral Deposition in boiling Hydrothermal Systems// Economic Geology, 1985. V. 80. P. 126-147.

Helgeson H.C., Kirkham D.H., and Flowers G.C. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures: IV. Calculation of activity coefficients, osmotic coefficients, and apparent molal and standard and relative partial molal properties to 600°C and 5 kb // Amer.J.Sci., 1981. V. 281. P. 1249-1516.

Krupp R.E., and Seward T.M. Transport and deposition of metals in the Rotokawa geothermal system, New Zealand // Mineral. Deposita, 1990, V. 25, P. 73-81.