

РАВНОВЕСИЕ И САМООРГАНИЗАЦИЯ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ МЕТАСОМАТИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

В.Л.Русинов, В.В.Жуков

ИГЕМ РАН

e-mail: rusinov@igem.ru

При анализе геологических процессов и, в частности, процессов минералообразования исследователи сталкиваются с противоречивой ситуацией: с одной стороны, на систему действует градиент внешних параметров и протекающие процессы явно неравновесны, а с другой стороны, доказано существование равновесия между минералами в ряде систем, а для характеристики условий широко и успешно применяются термодинамические расчеты. Поэтому важен анализ соотношений равновесия и неравновесия в геологических системах. Особенно мало изучены условия возникновения в сильно неравновесных системах специфических структур (пространственно-периодических и временных колебательных), являющихся продуктами самоорганизации.

Представление о равновесии и применении термодинамики к изучению петрологических процессов, произведшее революцию в петрологии, связано с именами В.Голдшмидта, Н.Боуэна и др. выдающихся ученых. На этом этапе исследований неравновесие в породах рассматривалось лишь как локальное отклонение от генерального тренда к равновесию из-за кинетических причин. В действительности практически все геологические процессы протекают необратимо. Между термодинамическим подходом и анализом реальных геологических систем существовало непреодолимое противоречие. Новый этап в истории петрологических исследований начался с введением понятия локального равновесия, явившегося мостом, который связал равновесную термодинамику с термодинамикой необратимых процессов. Примерно в одно и то же время и независимо Д.С.Коржинский впервые ввел понятие мозаичного равновесия при выводе модели метасоматической зональности, и в физике появилось аналогичное понятие локального равновесия. Оно было использовано Гленсдорфом и И.Пригожиным для разработки термодинамики необратимых процессов.

Необратимые процессы, протекающие в окрестности равновесия, подчиняются линейным соотношениям сил и потоков в системе: $L = XJ$, где роль феноменологического коэффициента L может играть термодинамический потенциал. Например, для химических реакций справедливо равенство $G = \sum \mu m$ (здесь химический потенциал μ представляет силу, а масса m компонента – поток). Траектории решений дифференциальных уравнений, описывающих кинетику системы, в линейной области направлены к положению равновесия, которое устойчиво и служит их аттрактором траекторий. Фактором эволюции таких систем служит рост энтропии ($dS/dt > 0$).

В сильно неравновесных процессах часть получаемой системой энергии расходуется на усложнение структуры системы, что нарушает линейное соотношение сил и потоков: $L + F(Q) = XJ$. В этих условиях действует универсальный критерий эволюции Пригожина – минимум производства энтропии: $P = dS/dt = \min (dP/dt > 0)$, который отражает факт замедленного роста энтропии системы вследствие возникновения в ней усложняющей внутренней структуры. Для устойчивости этой структуры необходим сток (диссипация) избыточной энергии активации из системы. В этом смысле структуру можно назвать диссипативной.

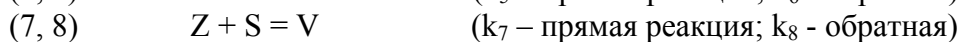
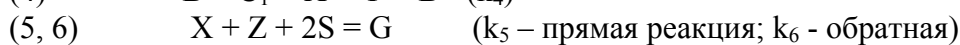
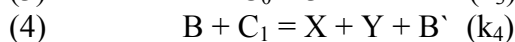
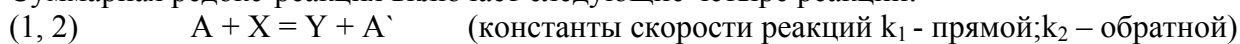
Рассмотрим взаимоотношения диссипативных структур, являющихся продуктом самоорганизации, с результатами процессов, протекающих в линейной области, на примере формирования метасоматической зональности. В общем виде метасоматическая зональность представляет собой колонку зон, различающихся парагенезисами метасоматических минералов и разделенных фронтами (Рис. 1). В модели Д.Коржинского, основанной на принципе локального химического равновесия (ЛХР), в пределах зон устанавливается равновесие минерал-раствор, а необратимые реакции сосредоточены на фронтах, которые не имеют

толщины. Динамическая модель (Русинов, Жуков, 1998) предполагает, что фронты имеют толщину, зависящую от кинетики метасоматических реакций. При отсутствии влияния кинетики результаты обеих моделей совпадают.

Принципиально иная ситуация возникает, если в системе раствор-порода возможны редокс реакции. Тогда при определенном сочетании кинетических коэффициентов и динамических параметров равновесное состояние может потерять устойчивость, а режим ЛХР смениться режимом бегущих волн или пространственно устойчивых колебаний концентраций.

В процессе разработки динамической модели метасоматической зональности нами изучался ритмично-полосчатый волластонит-геденбергитовый скарн (Дальнегорское боросиликатное месторождение). Модельная система представлена скарновой зоной, сложенной волластонитом с подчиненным количеством геденбергита, и фильтрующимся через зону гидротермальным раствором. Система включает 2 минерала (волластонит и геденбергит), водный раствор с ионами Fe^{3+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} (кремнезем присутствует в избытке, не влияя на ход реакций в системе). Колонка скарновой зональности имеет обычный для известковых скарнов вид: эндоскарн (Пл + Эп + Ди) – область бывшего контакта гранита с известняком (Гр) – зоны экзоскарна: Гр + Ди – Гр + Гед – Гед + Вол. При протекании раствора через последнюю зону в ней возникла ритмичная полосчатость (Вол-Гед-Вол-...). Для анализа процесса возникновения ритмики суммированы все возможные реакции в системе Гед + Вол + раствор, включая окисление-восстановление ионов железа, и составлены дифференциальные уравнения, связывающие кинетические коэффициенты.

Суммарная редокс-реакция включает следующие четыре реакции:



где $X - Fe^{2+}$; $Y - Fe^{3+}$; $C_0 -$ трёхъядерный комплекс $\langle Fe^{3+}_2Fe^{2+} \rangle_{aq}$; $C_1 -$ двухъядерный комплекс $\langle Fe^{3+} \rangle_{aq}$; $A, A', B, B' -$ данные в обобщённой форме окислитель (A, A') и восстановитель (B, B'); k_i ($i = 1, 2, 3, 4$) – кинетические константы соответствующих реакций. $G -$ геденбергит; $V -$ волластонит; $S - Si^{4+}$; $Z - Ca^{2+}$.

Моделирующая система приводится к следующей форме ($D -$ коэффициент диффузии; $r -$ расстояние по зоне; $u -$ скорость фильтрации):

$$\partial X / \partial t = D_x \partial^2 X / \partial r^2 - u \partial X / \partial r - k_1 X + k_2 Y - k_3 X Y^2 + k_4 Y^2 - G(k_5 X Z S^2 - k_6),$$

$$\partial Y / \partial t = D_y \partial^2 Y / \partial r^2 - u \partial Y / \partial r + k_1 X - k_2 Y + k_3 X Y^2 - k_4 Y^2,$$

$$\partial Z / \partial t = D_z \partial^2 Z / \partial r^2 - u \partial Z / \partial r - G(k_5 X Z S^2 - k_6) - V(k_7 Z S - k_8),$$

$$\partial S / \partial t = D_s \partial^2 S / \partial r^2 - u \partial S / \partial r - 2G(k_5 X Z S^2 - k_6) - V(k_7 Z S - k_8),$$

$$\partial G / \partial t = mG(k_5 X Z S^2 - k_6),$$

$$\partial V / \partial t = mV(k_7 Z S - k_8),$$

$$m = 1 - V_G G - V_V V$$

Анализ решений системы дифференциальных уравнений показал, что в определенных пределах концентрации окисного и закисного железа равновесное состояние неустойчиво, и появляются иные аттракторы, в том числе предельный цикл, соответствующий стоячим пространственным волнам окислительных условий в растворе. В результате волнового распределения в породе происходит перераспределение минералов и формирование вместо породы с равномерно распределенными Гед и Вол ритмично-полосчатых агрегатов. Описываемый процесс может рассматриваться как самоорганизация системы, поскольку основан на положительных обратных связях между компонентами раствора (с участием редокс-реакций) и между раствором и минералами. В процессе участвуют автокаталитические (1 – 4) и тормозящие гетерогенные (5 – 8) реакции, сочетание которых определяет нелинейность общего процесса. В

то же время это – и синергетический процесс, т.к. приводит к согласованному поведению компонентов системы с образованием концентрационных волн во всем объеме системы (в зоне колонки метасоматической зональности). Компьютерное моделирование показало, что возникающая структура изменяется со временем из-за взаимодействия диссипативной структуры раствора с ритмично-полосчатой породой.

Таким образом, необратимый в целом процесс формирования метасоматической зональности происходит в различных динамических режимах в разных областях системы: внутри части зон колонки метасоматизм протекает в окрестности равновесия в линейной области; на границах зон происходят необратимые реакции в нелинейной области с диссипацией части энергии; в зонах, где существенную роль играют редокс реакции равновесие неустойчиво и возникают устойчивые пространственные концентрационные волны (диссипативная структура).

Интерес к ритмично-полосчатым структурам в метасоматических породах и гидротермальных жилах связан не только с выяснением условий петрогенеза, но и с их ролью в качестве осадителей рудных компонентов. Широко распространены ритмично-полосчатые сульфидные руды в скарнах, в колчеданных и эпитеpmальных месторождениях. В кварц-адуляровых жилах повышенные концентрации золота и сопутствующих металлов приурочены к границам адуляровых полосок. В таких жилах примесные металлы могли, возможно, инициировать осцилляции окислительно-восстановительных условий в системе, тогда как в других случаях рудные минералы могли осаждаться на границах полос, как на барьерах.