

УДК 553.21/.24

ГЕОХИМИЯ

В. И. ПЕНЬКОВСКИЙ, Е. В. ЩЕРБАНЬ, И. П. ЩЕРБАНЬ

РАСЧЕТ ОДНОГО ИЗ ВАРИАНТОВ ДИФфуЗИОННОЙ МЕТАСОМАТИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

(Представлено академиком В. С. Соболевым 15 XII 1971)

Вопросы геохимической миграции элементов в процессах метасоматического преобразования пород привлекают внимание широкого круга исследователей. Д. С. Коржинский (¹⁻⁷) впервые сформулировал представления о диффузионном и инфильтрационном типах метасоматоза, обсудил возможности кинетического (¹) и термодинамического (^{2, 3}) путей изучения этих процессов и предложил системы дифференциальных уравнений для их описания. Им разработана теория дифференциальной подвижности компонентов, получившая широкое применение при изучении различных типов метасоматически измененных пород. Авторы поставили перед собой частную задачу, заключающуюся в описании и численном решении одного из простейших случаев диффузионной метасоматической зональности, формирование которой обусловлено, главным образом, изменением активности в гидротермальном растворе какого-либо одного «профилирующего» компонента. Геологические наблюдения и термодинамические расчеты указывают на то, что подобные типы зональности могли быть реализованы при околотрещинном развитии ряда процессов метасоматического преобразования пород, в частности процессов аргиллизации, листвинитизации, хлоритизации и др.

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ плоская трещина заполняется раствором с постоянной активностью реагирующего компонента $C = C_0$. Окружающая порода насыщена водой или раствором, нейтральным по отношению к раствору, заполняющему трещину. Давление раствора в трещине и поровом пространстве окружающих пород одинаково и сохраняется постоянным. Взаимодействие компонента раствора с смещающими породами обуславливается в этом случае диффузией его через породу. Так как скорости реакций достаточно велики, формирование метасоматических зон определяется активностью компонента. Пористость пород в процессе метасоматоза не изменяется. Рассмотрим случай, когда метасоматическая колонка состоит из двух зон.

Если признать, что $C(x, t)$ — активность реагирующего компонента в растворе ($C(x, t) < C_0$), а $C_{вн}$ и $C_{вт}$ — его активности на границах соответственно внешней и внутренней зон ($C_{вн} < C_{вт}$), то при $C \leq C_{вн}$ или $C \leq C_{вт}$ соответствующие реакции прекращаются. Обозначим положение границ внешней и внутренней метасоматических зон и диффузии реагирующего компонента через $x = S_i(t)$ где $i = 1, 2$. Тогда можно записать:

$$C(x, t) = \begin{cases} C_1 \geq C_{вт} & \text{для } 0 < x < S_1, \\ C_{вн} \leq C_2 \leq C_{вт} & \text{для } S_1 < x < S_2, \\ C_3 \leq C_{вн} & \text{для } S_2 < x. \end{cases}$$

В каждой зоне изменение активности реагирующего компонента описывается уравнением диффузии вида

$$D_0 \partial^2 C_{1,2} / \partial x^2 = \partial C_{1,2} / \partial t. \quad (1)$$

Для определения функций $C_{1,2}$, $S_1(t)$ и $S_2(t)$ имеем следующие начальные и граничные условия:

$$x = 0; \quad C_1 = C_0; \quad (2)$$

$$x = S_1(t) = 2\alpha\sqrt{D_0 t}, \quad C_1 = C_2 = C_{\text{вт}}; \quad (3)$$

$$D_0(\partial C_1/\partial x - \partial C_2/\partial x) = -\alpha_1 n_1^0 \alpha \sqrt{D_0}/\sqrt{t}; \quad (4)$$

$$x = S_2(t) = 2\beta\sqrt{D_0 t}, \quad C_2 = C_3 = C_{\text{вн}}; \quad (5)$$

$$D_0(\partial C_2/\partial x - \partial C_3/\partial x) = -\alpha_0 n_0^0 \beta \sqrt{D_0}/\sqrt{t}; \quad (6)$$

$$C_3(\infty) = 0; \quad (7)$$

Здесь α_0 и α_1 — коэффициенты, показывающие отношение количества молей реагирующего компонента в реакциях к количеству молей исходного вещества внешней зоны, молярные плотности которых соответственно равны $n_0 = \text{const}$ и $n_1 = \text{const}$, t — время, $n_0^0 = n_0/m$; $n_1^0 = n_1/m$ (m — открытая пористость), D_0 — коэффициент диффузии.

Задача сходна с задачей Стефана и имеет автомодельное решение, которое ищется в виде:

$$C_{1,2} = A_{1,2}^1 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_0 t}} + A_{1,2}^2, \quad C_3 = A_3^1 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_0 t}} + A_3^2.$$

Здесь A_i^1, A_i^2 ($i = 1, 2, 3$) — подлежащие определению константы.

Удовлетворяя условиям (2) — (7) находим:

$$A_3^1 = -C_{\text{вн}}/(1 - \operatorname{erf} \beta); \quad A_3^2 = -A_3^1,$$

$$A_1^1 = -(C_0 - C_{\text{вт}})/\operatorname{erf} \alpha; \quad A_1^2 = C_0,$$

$$A_2^1 = -(C_{\text{вт}} - C_{\text{вн}})/(\operatorname{erf} \beta - \operatorname{erf} \alpha); \quad A_2^2 = C_{\text{вт}} - A_2^1 \operatorname{erf} \alpha = C_{\text{вн}} - A_2^1 \operatorname{erf} \beta.$$

α и β должны удовлетворять следующей системе трансцендентных уравнений:

$$\beta = \alpha \left(1 + \frac{C_{\text{вт}} - C_{\text{вн}}}{C_0 - C_{\text{вт}} - 2\alpha_1 n_1^0 \alpha^2} \right), \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{1}{\alpha_1 n_1} \left(\frac{C_0 - C_{\text{вт}}}{2\alpha} - \frac{C_{\text{вн}}}{\sqrt{\pi} - 2\beta} - \alpha_0 n_0^0 \beta \right). \quad (9)$$

Мощности внутренней и внешней метасоматических зон, исходя из условий (4) и (6), характеризуются соответственно выражениями:

$$M_1 = 2\alpha\sqrt{D_0 t}, \quad M_2 = 2(\beta - \alpha)\sqrt{D_0 t}. \quad (10)$$

Из соотношения $M_1/M_2 = \alpha/(\beta - \alpha)$ можно получить

$$\beta = z\alpha, \quad (11)$$

где при изменении M_1/M_2 от 0,1 до 1 z изменяется от 11 до 2. Из уравнения (8), учитывая (11) для определенного значения M_1/M_2 , можно определить C_0 :

$$C_0 = (C_{\text{вт}} - C_{\text{вн}})/(z - 1) + C_{\text{вт}} + 2\alpha_1 n_1^0 \alpha^2. \quad (12)$$

Из уравнения (9) с учетом (11) и (12) получим

$$\alpha = \frac{1}{\alpha_1 n_1} \left(\frac{C_{\text{вт}} - C_{\text{вн}}}{2\alpha(z - 1)} + \alpha_1 n_1^0 \alpha - \frac{C_{\text{вн}}}{\sqrt{\pi} - 2z\alpha} - \alpha_0 n_0^0 z\alpha \right). \quad (13)$$

Реализация колонок рассмотренного типа в природных условиях может наступить, например, в результате последовательного падения активности некоторых компонентов при его диффузии в поровых растворах в околотрещинном пространстве в связи с реакциями раствора с вмещающи-

ми породами, падением температуры и пр. Не исключена возможность, что именно таким путем образовались колонки некоторых типов около-
жильных аргиллизированных пород, внутренние зоны которых сложены
каолинитом и кварцем, возникшими в условиях повышенной актив-
ности ионов водорода, в то время как внешние зоны содержат обычно се-
рицит, гидрослюда или монтмориллонит, т. е. минералы, кристаллизую-
щиеся при несколько меньшей активности H^+ . В случае околожильного
преобразования ультраосновных пород гидротермальными растворами, со-
держащими достаточные количества углекислоты, падение активности

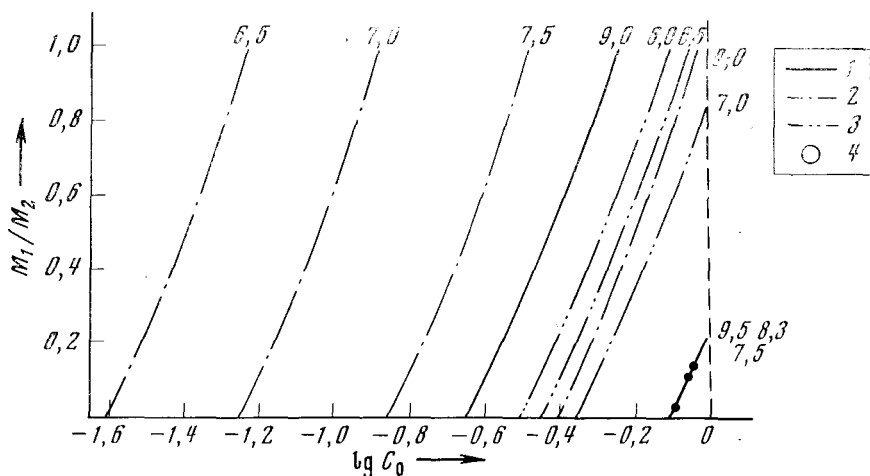


Рис. 1. Зависимость отношения внутренней и внешней зон от активности угле-
кислоты в растворе. 1 — при 25°, 2 — 100°, 3 — 200° C, 4 — величина pH раствора

этого компонента наряду с другими факторами может привести к образо-
ванию лиственитов вблизи залывандов жилы, смещающихся во внешней
зоне тальково-карбонатными породами. Изменение активности $[Mg^{2+}]$ при
постоянной $[K^+]$ в растворах, реагирующих с породами повышенной основ-
ности, вызывает, согласно термодинамическим расчетам, образование прак-
тически мономинеральной внутренней зоны, сложенной хлоритом, кото-
рая на некотором удалении от трещинных каналов замещается существен-
но серицитовыми образованиями. Количество подобных примеров можно
было бы увеличить.

Для численного решения приведенных уравнений необходимо распо-
лагать величинами активностей соответствующих компонентов в исход-
ном растворе и на границах метасоматических зон, а также данными, ха-
рактеризующими открытую пористость породы. Эти величины могут быть
найжены экспериментальным путем или с помощью термодинамических
расчетов.

В качестве примера можно привести рассмотренный одним из авторов
(⁸) распространенный в природных условиях процесс лиственитизации
серпентинитов, который характеризуется двухзональной метасоматиче-
ской колонкой. Результаты термодинамических расчетов указывают на то,
что минимальная активность суммарной углекислоты, необходимая для
образования внешней зоны, сложенной тальково-карбонатными породами,
т. е. в рассматриваемом случае C_0 , должна быть в стандартных условиях
не менее $10^{-4,25}$ при pH 9,0, а активность этого компонента при формиро-
вании внутренней зоны, представленной кварцево-магнезитовой ассоциа-
цией, не может опуститься ниже $10^{-2,3}$ при pH раствора $\approx 7,2$. Возраста-
ние кислотности раствора и повышение ее температуры влечет за собой
значительное увеличение равновесной активности суммарной углекисло-
ты. Если при этом ограничить верхний предел активности $\sum CO_2$, ко-

торый в первом приближении на основании данных изучения газово-жидких включений и вод современных гидротерм может быть принят равным 1 мол/л, а также задаться определенной величиной пористости пород, в данном случае 20%, то, используя приведенные выше уравнения, можно получить для определенных температур некоторые параметры, характеризующие рассматриваемую метасоматическую колонку и, в частности, соотношение ее внешней и внутренней зон.

Результаты таких расчетов для температуры 25, 100 и 200°С представлены для различных значений рН на рис. 1. Из него следует, что в случае, если рН и температура раствора остаются постоянными, то соотношение мощностей внешней и внутренней метасоматических зон определяется по существу суммарной активностью углекислоты. Например при рН 6 и температуре 200°С соотношение мощностей может измениться от 0,1 до 1,0, если $[\sum \text{CO}_2]$ повышается от $10^{-0,46}$ до $10^{-0,1}$. Для более высоких значений рН раствора при постоянных температуре и величине отношения M_1/M_2 требуется большее количество $[\sum \text{CO}_2]$, которое в ряде случаев, например, при рН 7,5 и $t = 200^\circ\text{C}$, может превысить 1,0 мол/л и, таким образом, выйти за рамки принятого выше ограничения. Понижение температуры гидротермального раствора, связанное, как известно, со значительным возрастанием активности суммарной углекислоты, приводит к некоторому увеличению отношения внутренней зоны к внешней и тем самым оказывает положительное влияние на развитие процесса литвенизации.

Таким образом, использование предложенных уравнений позволяет получить количественную оценку ряда важных параметров, характеризующих метасоматические колонки двухзонального строения и, в частности, соотношение метасоматических зон при заданных величинах предельных концентраций компонентов, определяющих ход реакций в исходном растворе и на границах этих зон при известных значениях пористости породы. Возможно, естественно, также решение обратной задачи, состоящей в определении активностей некоторых компонентов в растворе и на границах метасоматических зон по известным соотношениям мощностей и пористости, которые могут быть получены в результате непосредственных замеров.

Институт гидродинамики и
Институт геологии и геофизики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
15 XI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. С. Голубев, А. А. Гарибянц, Гетерогенные процессы геохимической миграции, «Наука», 1968. ² В. А. Жариков, Геол. рудн. месторожд., № 3, 4 (1965). ³ В. А. Жариков, Геохимия, № 10 (1965). ⁴ Д. С. Коржинский, Изв. АН СССР, сер. геол., № 2 (1947). ⁵ Д. С. Коржинский, ДАН, 77, № 2 (1952). ⁶ Д. С. Коржинский, ДАН, 78, № 1 (1951). ⁷ Д. С. Коржинский, ДАН, 84, № 4 (1952). ⁸ И. П. Щербась, Г. А. Боровикова, ДАН, 191, № 6 (1970).