

УДК 553.065.5

ГЕОХИМИЯ

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

РАСЧЕТ ДВУХЧЛЕННЫХ ИНФИЛЬТРАЦИОННО-ДИФфуЗИОННЫХ МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ КОЛОНОК

(Представлено академиком В. С. Соболевым 31 III 1975)

В статье предпринята попытка описания и расчета колонок, сформировавшихся в результате совместного проявления инфильтрационного и диффузионного метасоматоза. Как известно, именно такой механизм реализуется при развитии целого ряда природных метасоматических процессов, например при образовании скарпов, околотрепчинных метасоматитов и некоторых других.

При решении поставленной задачи приняты следующие допущения. Скорости реакций метасоматоза сравнительно велики, в результате чего образование парагенезисов, составляющих метасоматическую колонку, определяется активностью компонентов в растворе. Колонка характеризуется двухчленным строением. Давление раствора в подводящем плоскопараллельном канале (P_0) постоянно и превышает давление в поровом пространстве породы (P_1). Фильтрационные характеристики породы (коэффициент фильтрации K и эффективная пористость m) в процессе метасоматоза не изменяются. Активность компонентов в растворе, заполняющем канал, постоянна: $C=C_0$.

Обозначим активность реагирующего компонента в растворе

$$C_i(x, t) = \begin{cases} C_{вт} < C_1 & \text{при } 0 < x < S_1, \\ C_{вн} < C_2 < C_{вт} & \text{при } S_1 < x < S_2, \\ C_3 < C_{вн} & \text{при } S_2 < x < S_3, \end{cases}$$

где $x=S_i(t)$, $C_{вт}$, $C_{вн}$ — соответственно положение границ внутренней (индекс 1) и внешней (индекс 2) метасоматических зон, фронта проникновения реагирующего компонента в породу (индекс 3) и активности раствора на границах метасоматических зон. Тогда $M_1=S_1(t)$ и $M_2=S_2(t)-S_1(t)$ будут представлять мощности этих зон. При $C_2(x, t) < C_{вт}$ и $C_3(x, t) < C_{вн}$ реакции преобразования пород прекращаются.

Из закона Дарси для величины скорости фильтрации $v=-K \partial P / \partial x$ и кинематического условия вида $v(t)=m \partial S / \partial t$ получаем:

$$v(t) = \frac{a}{2\sqrt{t}} \quad (a = \sqrt{2m\Delta PK}, \quad \Delta P = P_0 - P_1).$$

Изменение активности реагирующего компонента в колонке описывается следующим уравнением конвективной диффузии:

$$D_0 \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \frac{a}{2m\sqrt{t}} \frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{\partial C_i}{\partial t} \quad (i=1, 2, 3). \quad (1)$$

Для определения функций C_i , $S_1(t)$ и $S_2(t)$ получаем следующие начальные и граничные условия:

$$\left. \begin{aligned} x=0; \quad C_1=C_0; \\ x=S_1(t); \quad C_1=C_2=C_{\text{вн}}; \\ -mD_0 \frac{\partial C_1}{\partial x} + mD_0 \frac{\partial C_2}{\partial x} = \alpha_1 n_1 \frac{dS_1}{dt}; \\ x=S^2(t); \quad C_2=C_3=C_{\text{вн}}; \\ -mD_0 \frac{\partial C_2}{\partial x} + mD_0 \frac{\partial C_3}{\partial x} = \alpha_0 n_0 \frac{dS_2}{dt}; \\ x=S_3(t) = \frac{a\sqrt{t}}{m}; \quad -mD_0 \frac{\partial C_3}{\partial x} = 0; \\ S_1(0)=S_2(0)=0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

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

Задача (1) — (2) решается аналогично тому, как это сделано в работе (4).

Мощности внутренней и внешней метасоматических зон при этом характеризуются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} M_1 &= 2\alpha\sqrt{D_0 t}, \\ M_2 &= 2(\beta - \alpha)\sqrt{D_0 t}. \end{aligned}$$

Как показывают расчеты, в реальных природных условиях $\beta = z\alpha < 10^{-3} - 10^{-2}$. Поэтому для определения α и C_0 при заданных M_1/M_2 , $C_{\text{вн}}$, $C_{\text{вн}}$ получаем следующие упрощенные уравнения:

для $\delta = a(2m\sqrt{D_0})^{-1} < 10^2$

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sqrt{(C_{\text{вн}} - C_{\text{вн}})/2z(z-1)\alpha_0 n_0^0}}{1 - \delta z \sqrt{(C_{\text{вн}} - C_{\text{вн}})/2z(z-1)\alpha_0 n_0^0}}, \\ C_0 &= C_{\text{вн}} - 2\alpha^2 (\alpha_1 n_1^0 e^{-2\delta\alpha} + \alpha_0 n_0^0 e^{-2z\delta\alpha}); \end{aligned}$$

для $\delta > 10^2$

$$\alpha = \frac{\delta(C_{\text{вн}} - C_{\text{вн}})/\alpha_0 n_0^0}{z\{1 - \exp[-2\delta(z-1)\alpha]\}},$$

$$\begin{aligned} C_0 &= C_{\text{вн}} + \delta^{-1}(1 - e^{2\delta\alpha}) \{ \alpha_0 n_0^0 z \exp[(z\alpha)^2 - 2\delta\alpha(z-1)] + \alpha_1 n_1^0 \alpha \exp(\alpha)^2 \} \\ (n_0^0 &= n^0/m; \quad n_1^0 = n_1/m). \end{aligned}$$

Приведенные уравнения описывают зависимость между активностями компонентов в растворе параметрами α и $\beta - \alpha$, которым пропорциональны мощности метасоматических зон, и величиной δ , близкой по своей физической сущности к параметру Пекле. Для проведения расчетов необходимо располагать величинами отношения мощностей метасоматических зон и значениями активностей компонентов на границах обеих зон или одной из них и в исходном растворе, а также данными, характеризующими пористость и проницаемость пород.

В рассмотренном в качестве примера случае околотрещинной лиственитизации серпентинитов принято, что исходная активность ΣCO_2 не превышала 1 мол/л, а активности этого компонента на границах внутренней и внешней зон в стандартных условиях не опускались, соответственно, ниже

$10^{-2,5}$ и $10^{-4,25}$ мол./л. При увеличении температуры раствора равновесные активности углекислоты на границах зон значительно возрастают. Все эти данные получены путем термодинамических расчетов ⁽²⁾. Величина пористости принята равной 0,2.

Результаты расчетов для температуры 200° С при M_1/M_2 , изменяющейся от 0,1 до 1,0, и величине δ , увеличивающейся от 0,5 до 10^5 , приведены на рис. 1. Из него следует, что, когда δ не превышает 10^2 — 10^4 , конвективный перенос реагирующего компонента практически не влияет на образование метасоматических колонок. В этом случае мощности зон сравнительно невелики и сопоставимы с их мощностями при диффузионном метасоматозе ⁽¹⁾. При возрастании величины δ влияние конвективной

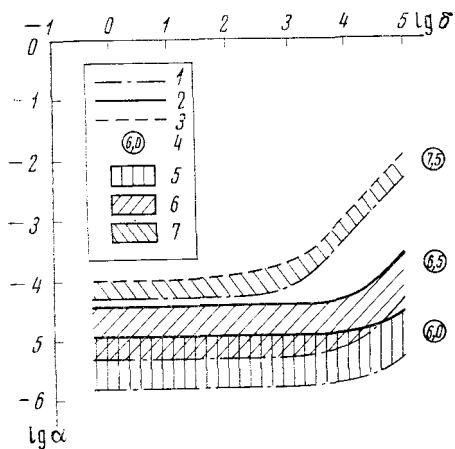


Рис. 1

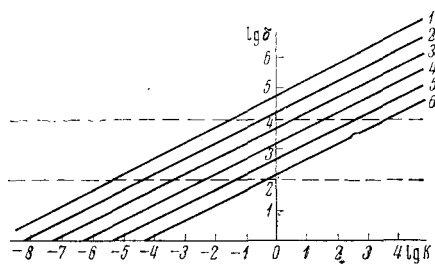


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость α от δ при различных соотношениях мощностей внутренней и внешней метасоматических зон (M_1/M_2) и разных величинах pH. 200° С. 1 — $M_1/M_2=0,1$; 2 — $M_1/M_2=1,0$; 3 — верхний предел значения α ; 4 — значения pH; 5 — область значений α при pH 6,0 и $M_1/M_2=0,1$ —1,0; 6 — то же при pH 7,5 и $M_1/M_2=0,1$ —1,0; 7 — то же при pH 8,3 и $M_1/M_2=0,1$ —0,6

Рис. 2. Зависимость δ от проницаемости. 1 — $m=0,02$, $\Delta P=10^4$ атм.; 2 — $m=0,02$, $\Delta P=10^3$ атм. и $m=0,2$, $\Delta P=10^4$ атм.; 3 — $m=0,02$, $\Delta P=10^2$ атм. и $m=0,2$, $\Delta P=10^3$ атм.; 4 — $m=0,02$, $\Delta P=10^4$ атм. и $m=0,2$, $\Delta P=10^2$ атм.; 5 — $m=0,02$, $\Delta P=1$ атм. и $m=0,2$, $\Delta P=10$ атм.; 6 — $m=0,2$, $\Delta P=1$ атм.

миграции компонентов на процесс формирования метасоматических колонок усиливается, что, в частности, способствует увеличению их мощностей. Таким образом, величина δ является одним из важнейших параметров, определяющих характер метасоматического преобразования пород.

На рис. 2 показано влияние на величину δ проницаемости пород. При этом коэффициент диффузии D_0 принят постоянным и равным 10^{-3} м² в сутки ⁽³⁾; значения пористости пород взяты 0,02 и 0,2, в пределах которых она обычно изменяется; перепад давлений раствора в подводящем канале и в поровом пространстве пород ΔP изменяется от 10 до 10^5 м в.ст.

Как можно видеть, при сравнительно небольших значениях $K < 10^{-3}$ м в сутки, сопоставимых с величиной коэффициента диффузии, влияние переноса компонентов инфильтрационным путем на процесс преобразования пород весьма незначительно, даже при условии максимальных перепадов давлений порядка нескольких килобар. Увеличение проницаемости пород влечет за собой последовательное возрастание значения фильтрационного способа миграции вещества в процессах метасоматоза, и при величинах $K > 1$ м в сутки этот способ преобразования становится главным, а затем практически единственным. Исходя из изложенного, можно заключить, что преобразование массивных кристаллических пород, характеризующихся, как известно, сравнительно низкими коэффициентами про-

проницаемости порядка 10^{-9} дарси, происходит главным образом путем диффузионного метасоматоза, в то время как в зонах повышенной трещиноватости, обладающих проницаемостью, на несколько порядков превышающей величины коэффициента диффузии, решающую роль приобретает инфильтрационный способ переноса компонентов и преобразования пород.

Таким образом, полученные решения позволяют установить для двухчленных инфильтрационно-диффузионных метасоматических колонок количественные зависимости между активностями компонентов в исходном растворе и на границах зон и соотношениями их мощностей, а также оценить влияние на развитие процессов метасоматоза проницаемости пород, давления и других параметров. Кроме того, при наличии исходных данных можно рассчитать, какой из способов миграции вещества — диффузионный или инфильтрационный — является преобладающим в условиях конкретных метасоматических процессов.

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

Поступило
21 I 1975

Новосибирский государственный университет

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Пеньковский, Е. В. Щербань, И. П. Щербань, ДАН, т. 240, № 2 (1973).
² И. П. Щербань, Г. А. Боровикова, ДАН, т. 191, № 6 (1970). ³ А. С. Лапухов, Геология и геофизика, № 12 (1966).