

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МИГРАЦИИ БЕРИЛЛИЯ И БОРА В ЭКЗОКОНТАКТАХ ПЕГМАТИТОВ МАМСКОЙ СЛЮДОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

На основе данных о распределении бериллия и бора в ореолах рассеяния около двух пегматитовых жил Мамской слюдоносной провинции рассчитано, что эти элементы мигрировали из пегматитов в потоках флюидов и осадились в околожилных пространствах в количестве 0,19 и 1,53 кг на 1 м² контакта пегматитов соответственно. Результаты модельных расчетов рассмотрены с точек зрения авто- и аллометасоматического происхождения ореолов рассеяния. Исследована возможность генерации ореолообразующих флюидов пегматитовыми телами. Тело мощностью 10 м могло генерировать флюид в количестве 1,5 м³/м². Для этого случая изучены условия сохранения материального баланса между производством и оттоком флюида.

Первичные инфильтрационные ореолы рассеяния химических элементов вокруг пегматитовых тел представляют значительный научный интерес: распределение элементов характеризует позднюю стадию пегматитового процесса, в частности, историю формирования ореолов. Автор оценил некоторые параметры миграции бериллия и бора, используя данные о распределении этих элементов вблизи мусковитовых жил в Мамской слюдоносной провинции.

В геологическом строении района принимают участие породы позднепротерозойского возраста, метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации. Преобладают биотитовые и биотит-мусковитовые гнейсы и сланцы.

Жила 20 Кочектинского месторождения сложена мусковит-плагиоклазовыми пегматитами, отличается высоким содержанием берилла, занимает секущее положение относительно вмещающих гнейсов, круто падает на юго-восток. Форма жилы плитообразная, осложненная мало мощными апофизами, мощность около 10 м.

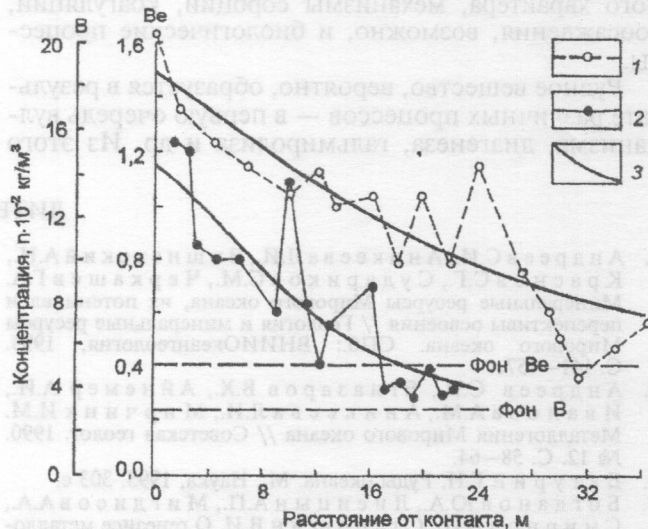
Жила 92 месторождения Нижняя Луговка сложена двуполевошпатовыми пегматитами, содержит в большом количестве турмалин — основной борсодержащий минерал, имеет крутопадающие секущие контакты с вмещающими гнейсами, средняя мощность 10 м.

Жилы вскрыты штольнями на нескольких горизонтах. Эти жилы выбраны в качестве объектов исследования, так как окружены необычайно широкими, ярко выраженными ореолами рассеяния изученных компонентов. Данные о распределении бериллия и бора в экзоконтактах пегматитов (рисунк) взяты из [2].

Ореолы изучены единичными профилями опробования, что не позволяет судить о форме в объеме. Невозможно также сравнивать жилы по одним и тем же компонентам: каждая из жил богата одним компонентом (и окружена его ореолом рассеяния), но бедна другим.

Бериллий и бор мигрировали из пегматитов во вмещающие породы в потоках флюидов, формирующих околожилные ореолы, что сопровождалось кварц-мусковитовым замещением пегматитов [2].

Ввиду недостатка и высокой погрешности исходных данных для оценок выбрана простейшая



Распределение элементов в экзоконтактах слюдоносных жил: 1, 2 — наблюдаемые значения концентраций: 1 — бериллия, жила 20; 2 — бора, жила 92; 3 — расчетные концентрационные кривые

модель процесса, не учитывающая различий в формах переноса и осаждения вещества. Модель устанавливает соотношения между наблюдаемыми концентрациями мигрировавшего компонента в породе и ненаблюдаемыми параметрами. Достоверность полученных величин можно оценить, используя независимые данные.

Примем, что перед началом поступления флюидов с концентрацией компонента c_0 вмещающие породы были пропитаны поровыми растворами фоновой концентрации c . Содержания компонентов во вмещающих породах фоновые (q_0). Компоненты мигрировали с постоянной скоростью.

Основные уравнения миграции вещества с подземными водами рассмотрены, например, в [4]. Динамика массообмена описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \gamma (c - c_0), \quad (2)$$

$$q(x,0) = q_0, \quad c(x,0) = c_*, \quad c(0,t)c_0, \quad (3)$$

$$q(0,t) = q_0 + \gamma(c_0 - c_*)t, \quad (4)$$

где x — расстояние от контакта, t — время, u — скорость фильтрации компонента, D — коэффициент диффузии компонента в растворе, γ — константа скорости осаждения компонента, c_* , q — текущие концентрации компонента в растворе и в породе соответственно.

Хотя изучаемые ореолы рассеяния считаются инфильтрационными [2], в модельных расчетах не следует пренебрегать влиянием диффузии на процесс.

Систему уравнений (1) (4) решали численно по неявной разностной схеме. Шаги разностной сетки $\Delta x = 0,1$ м, $\Delta t = 10$ лет. Процедура многовариантная: последовательно подбирая значения шести параметров — c_0 , c_* , D , γ , u , T (T — продолжительность просачивания флюида), добивались наименьшего отклонения модели от эмпирических данных. Цель достигнута при значениях параметров, приведенных в таблице. Получены теоретические кривые распределения элементов (рисунков).

Судя по невысоким значениям D (таблица), диффузия не играла существенной роли в миграции изученных элементов, т. е. подтверждено инфильтрационное происхождение их ореолов рассеяния.

Количество компонента, просочившегося через

Количественные оценки параметров миграции бериллия и бора в экзоконтактах пегматитов

Параметр	Ве (жила 20)	В (жила 92)
q_0 , кг/м ³	0,004	0,03
c_0 , 10 ⁻² кг/м ³	0,25	7
c_* , 10 ⁻³ кг/м ³	0,074	2,1
D , 10 ⁻⁶ м ² /год	9,4	14
γ , 10 ⁻⁴ год ⁻¹	5,7	2,4
u , м/год	0,01	0,02
T , тыс. лет	8	7
V , м ³ /м ²	160	70
F , кг/м ²	0,39	4,9
F_1 , кг/м ²	0,19	1,5

1 м² контакта пегматитов с вмещающими породами, определяется выражением:

$$F = uc_0T. \quad (5)$$

Величина F незначительно меняется от одного варианта расчетов к другому, что позволяет не только вычислять по (5) значение T — один из конечных результатов частного варианта расчетов, но и поддерживать на заданном уровне, варьируя величинами u и c_0 . Малая изменчивость величины F означает, что ее оценки устойчивы. Количество компонента F_1 , осадившегося в околожильном ореоле, определено по графику — площадь криволинейной фигуры, ограниченной концентрационной кривой и прямой $q = q_0$. Поскольку значения F_1 фактически сняты с графика, они вполне достоверны.

Хотя значения F и F_1 получены разными способами, соотношение между F и F_1 реальное: $F > F_1$ (как отношение части и целого), что повышает доверие и к оценкам расчетной величины F .

По обеим жилам наиболее тесное приближение модели к эмпирическим данным достигнуто при близких значениях T (таблица), несмотря на то что жилы расположены на разных месторождениях, а расчеты проведены для различных химических элементов. Этот результат хорошо согласуется с тем, что бериллий и бор мигрировали в составе флюидов в ходе одного и того же процесса — формирования кварц-мусковитового комплекса [2]. Вероятно, этот процесс шел одновременно с одной и той же длительностью во всех частях Мамской слюдоносной провинции.

Объем V флюида, прошедшего через 1 м² контакта пегматитов, можно оценить по формуле:

$$V = F/c_0. \quad (6)$$

Для жил 20 и 92 величина V равна 160 и 70 м³/м² соответственно (таблица). Каковы источники таких больших объемов вещества? Источниками растворов могут служить либо сами пегматитовые тела, либо глубинные источники (классическая дилемма авто-аллометасоматоз). Обсудим результаты модельных расчетов с этих точек зрения.

Предположим, что источниками ореолообразующих флюидов были сами жилы. Оценим способность пегматитовых тел генерировать флюиды. Пегматитовые расплавы обычно содержат до 10% весовых (25% объемных) воды. Поскольку пегматит слюдоносный, примерно 2% воды должно расходоваться на гидролиз полевых шпатов с образованием кварц-мусковитового комплекса. Остальная вода (23% объема пегматитового расплава) в виде флюида уйдет в боковые породы. Нетрудно подсчитать, что пегматитовое тело плитообразной формы мощностью 10 м на 1 м² поверхности контакта может генерировать 1,5 м³ флюида. Однако по модельным расчетам количество флюида, просочившегося через контакт, составляет 70—160 м³. Такое неравенство между производством и оттоком флюида вынуждает проанализировать ситуацию с позиции сохранения баланса вещества.

С одной стороны, при малой мощности источника (1,5 м³/м²) поток флюида мог достичь величины 160 м³/м², но только в небольших участках контакта и при условии, что весь произведенный флюид вытекал из пегматитового тела через такие участки. Их суммарная площадь для жилы 20 равна 1,5 : 160 ≈ 1 % поверхности контакта, для жилы 92 — 1,5 : 70 ≈ 2 %. Столь низкая флюидопроницаемость контактов пегматитовых тел нереальна, значения V кажутся завышенными. Отсутствие сведений о флюидных потоках на других участках пегматитовых тел не позволяет проверить правильность высказанных суждений. Отсюда вытекает необходимость исследовать ореолы рассеяния по нескольким профилям опробования.

С другой стороны, допустим, что поток флюида, произведенный пегматитовым телом, был равномерным на всей поверхности контакта тела, т. е. равнялся в среднем 1,5 м³/м². Тогда на участке контакта, к которому примыкает профиль опробова-

ния по жиле 20, с учетом $F = 0,39 \text{ кг/м}^2$, согласно соотношению (6), средняя концентрация бериллия в растворе должна быть $0,39 : 1,5 = 0,26 \text{ кг/м}^3$; аналогично по жиле 92 для бора — $4,9 : 1,5 = 3,3 \text{ кг/м}^3$. Обозначим эти концентрации через c_1 .

Здесь уместно оценить достоверность расчетных концентраций элементов. Расчетные фоновые концентрации бериллия и бора в поровых растворах ($0,74 \cdot 10^{-4}$ и $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ соответственно) близки к средним фоновым концентрациям этих элементов в подземных водах, составляющим $(1-3) \cdot 10^{-4}$ и $(1,2-10) \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ соответственно [1]. Оценка концентрации бора во флюиде $7 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ отвечает пределам колебаний содержания этого элемента в горячих источниках — $5 \cdot 10^{-4} - 0,1 \text{ кг/м}^3$ [1]. Однако, по данным [3], концентрация бериллия в рудообразующих растворах бериллиевого месторождения изменяется от 0,3 до 2, а концентрация бора — от 0,9 до 6 кг/м^3 . Таким образом, достоверность расчетных концентраций элементов во флюидах оказывается под вопросом. Проверить это можно, анализируя составы флюидных включений в минералах пегматитов и вмещающих пород, однако по изученным объектам таких данных нет. Если не удастся достоверно установить точечную оценку параметра, то следует определить хотя бы его интервальную оценку. Будем считать, что истинные значения c_0 лежат в интервале от модельных значений до c_1 .

Предположим, что на изучаемых объектах концентрации элементов во флюидах достигали уровня c_1 . В этом случае значения c_0 возрастут по сравнению с модельными значениями на два порядка. Посмотрим, как в этой связи изменяются другие величины в (5). Как показали многовариантные модельные расчеты, F — величина довольно стабильная. Поэтому основные изменения должны коснуться скорости и продолжительности фильтрации,

причем в сторону понижения. Расчетная продолжительность процесса невысока по геологическим меркам — несколько тысяч лет. Представляется, что резерв снижения ее оценок мал. Больше всего должны уменьшиться значения скорости фильтрации — до десятитысячных долей метра в год. Поэтому интервальная оценка этой величины составит $0,0001 - 0,02 \text{ м/год}$.

Таким образом, если придерживаться автометасоматического происхождения ореолов рассеяния, то, как показал анализ, проведенный с учетом баланса «производство—отток флюида», возможны два крайних случая: ореолы рассеяния формируются либо малыми объемами высококонцентрированных флюидов, либо большими объемами умеренно концентрированных флюидов. Мало-мощные источники — пегматитовые тела — в первом случае производят слабые потоки, равномерно распределенные по поверхности тел, во втором — интенсивные потоки, сосредоточенные на ограниченных участках контактов. Наиболее вероятен промежуточный, равновесный между этими взаимоисключающими случаями, вариант.

Предположение о глубинном происхождении ореолообразующих растворов, по-видимому, снимает проблему баланса вещества, так как их гипотетический источник представляется достаточно емким. Именно этой точке зрения больше всего соответствуют, якобы подтверждающая ее, результаты модельных расчетов, судя по высоким оценкам объемов просочившихся флюидов, которые, однако, основаны на недостоверных оценках концентраций элементов в растворах.

Для решения вопроса об источнике ореолообразующих растворов нужны как минимум данные по опробованию околожильного пространства по нескольким профилям, а также данные по составу флюидных включений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беус А.А., Грибовская Л.И., Тихонова Н.В. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976. 248 с.
2. Макрыгина В.А., Макагон В.М., Загорский В.Е., Шмакин Б.М. Слюдоносные пегматиты. Новосибирск: Наука, 1990. Т. 1. 233 с.
3. Стельмаченок К.З., Ишков Ю.М. Металлоносность рудообразующих растворов Ермаковского бериллиевого

месторождения (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2001. № 5. С. 802—814.

4. Шестаков В.М. Гидродинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.

АООТ «Союзнеруд»
Рецензент — И.И. Куприянова