

С. Б. БРАНДТ, Н. Н. ФЕФЕЛОВ

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУР ИНТРУЗИЙ  
ПО ЭКЗОКОНТАКТОВЫМ ОРЕОЛАМ РАДИОГЕННОГО АРГОНА

(Представлено академиком Д. С. Коржинским 11 V 1973)

Поля концентраций радиогенных веществ в приконтактовых областях интрузивных тел использовались для получения информации о физико-химических и временных условиях внедрения магмы во вмещающие породы (1, 2, 4).

Подходы в этих работах небезупречны, так как исходные предпосылки расчетов могут произвольно варьировать в широком диапазоне. Сомнительна возможность имитировать условия становления интрузива путем лабораторного отжига в вакууме, в атмосфере или других средах. Выпадают эвтектические соотношения и учет воздействия флюидов. Столь же неопределенны оценки тепловых полей интрузивов.

Эти обстоятельства оправдывают постановку вопроса о возможности построения калий-argonового геотермометра, независимого от каких-либо гипотез и внешних количественных оценок и основанного исключительно

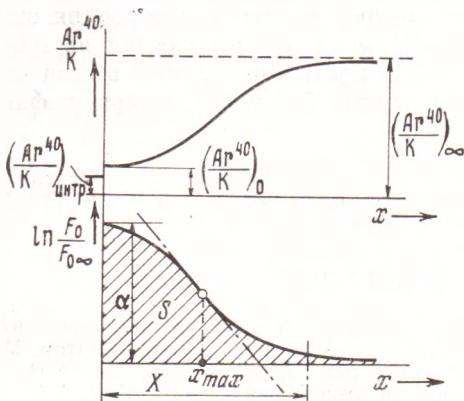


Рис. 1

Рис. 1. Экзоконтактовый ореол аргон-калиевого отношения.  $x$  — расстояние от контакта

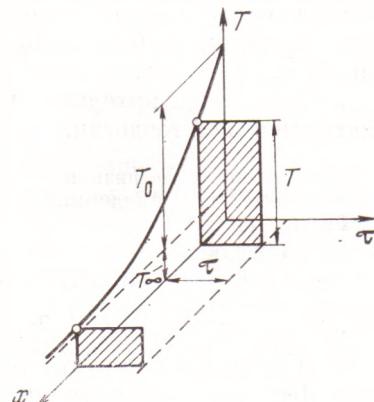


Рис. 2

Рис. 2. Температурное воздействие на экзоконтактовые породы, выраженное эквивалентным тепловым импульсом одинаковой длительности  $\tau$  и убывающей температурой  $T$

на концентрациях радиогенного аргона. Настоящая работа посвящена демонстрации принципиальных основ метода, который может быть впоследствии усовершенствован, вплоть до создания программ для ЭВМ любой сложности.

Итак, возьмем за исходное экзоконтактовый ореол аргон-калиевого отношения  $Ar^{40}/K$  для какой-нибудь минеральной фракции породы, например биотита, изображенный схематически на рис. 1.  $Ar^{40}/K$  плавно изменяется от величины  $(Ar^{40}/K)_0$ , близкой к  $(Ar^{40}/K)_{\text{инт}}$  для интрузива

расстоянии от контакта  $x = 0$ , и стремится к асимптотическому значению  $(Ar^{40}/K)$ , при увеличении  $x$ .

Будем основывать дальнейшие рассуждения на диффузионных механизмах потерь минералами радиогенного аргона. Аналогичные выкладки могут быть проведены и для любого другого механизма. Предположим, что длительность теплового воздействия незначительна в геологическом времени.

Известно <sup>(3)</sup>, что для диффузионных моделей концентрация радиогенного аргона определяется однозначно безразмерным критерием подобия Фурье

$$F_0 = D_0 \tau / a^2 = D_0 \tau / a^2 \exp(-E/RT), \quad (1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии,  $a$  — характеристический размер зерна минерала,  $\tau$  — время воздействия,  $E$  — энергия активации диффузии,  $T$  — температура.

Критерий Фурье можно определить по номограммам <sup>(3)</sup>, исходя из относительных концентраций радиогенного аргона

$$q = (Ar^{40}/K) / (Ar^{40}/K)_\infty.$$

Предположим, что тепловое воздействие на минералы экзоконтактовой зоны приводится к тепловому импульсу одинаковой длительности  $\tau$  (рис. 2), но монотонно убывающей высоты  $T$ , которая выражается, например, функцией

$$T = T_0 e^{-kx} + T_\infty, \quad (2)$$

где  $T_0$  — избыточная температура в контакте ( $x=0$ ),  $k$  — коэффициент затухания теплового импульса,  $T_\infty$  — температура вмещающей среды. При этих условиях критерий Фурье (1) будет

$$\begin{aligned} F_{0x} &= C \exp[-E/(R(T_0 e^{-kx} + T_\infty))], \\ C &= D_0 \tau / a^2, \\ \ln(F_{0x}/F_{0\infty}) &= \ln C - \frac{E}{R} [1/(T_0 e^{-kx} + T_\infty)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Асимптотическое значение критерия Фурье:

$$\ln F_{0\infty} = \lim_{x \rightarrow \infty} \ln C \exp[-E/(R(T_0 e^{-kx} + T_\infty))] = C e^{-E/RT_\infty}. \quad (4)$$

Тогда

$$\ln(F_{0x}/F_{0\infty}) = E/R \{ (1/T_\infty) - [1/(T_0 e^{-kx} + T_\infty)] \}. \quad (5)$$

Введем несколько параметров, характеризующих избранную модель. Вычислим площадь под кривой (5):

$$S = \int_0^\infty \ln \frac{F_{0x}}{F_{0\infty}} dx = \frac{E}{RT_\infty k} \ln(1+y), \quad \left( y = \frac{T_0}{T_\infty} \right). \quad (6)$$

Далее убеждаемся, что первая производная выражения (5) по расстоянию равна

$$\partial/\partial x \ln(F_{0x}/F_{0\infty}) = (kT_0 E/R) (e^{-kx}/T^2). \quad (7)$$

Она имеет максимум (или, что то же самое, кривая (5) имеет перегиб) в точке  $x_{\max}$ , причем

$$e^{kx_{\max}} = T_0 / T_\infty = y. \quad (8)$$

Нетрудно видеть, что  $x_{\max}$  не зависит от  $T_\infty$ . Подставляя (8) в (2), убеждаемся, что в точке перегиба температура равна удвоенной температуре

среды  $T_\infty$ :

$$T_{x_{\max}} = 2T_\infty. \quad (9)$$

Нам понадобятся также величины

$$\alpha = \ln(F_{0x}/F_{0\infty}) = (E/RT_\infty)(y/(1+y)), \quad (10)$$

$$\beta = \ln(F_{0x}/F_{0x_{\max}}) = (E/2RT_\infty)[(y-1)/(y+1)], \quad (11)$$

а также величина производной (7) в точке перегиба:

$$\gamma = [\partial/\partial x \ln(F_{0x}/F_{0\infty})]_{x_{\max}} = (E/4RT_\infty x_{\max}) \ln y. \quad (12)$$

Приведенных соотношений достаточно, чтобы определить превышение температуры контакта над температурой среды  $y = T_0/T_\infty$ , а также энергию активации для соответствующего минерала  $E$ . При этом возможны два подхода.

Первый подход. Деля (6) на (10) и используя (8), получаем

$$S/\alpha x_{\max} = [(1+y) \ln(1+y)]/y \ln y = f(y). \quad (13)$$

В левой части (13) все величины определяются по заданному ореолу (рис. 1):  $S$  — площадь под кривой  $\ln(F_{0x}/F_{0\infty})$ ,  $\alpha$  — максимальная ордината кривой,  $x_{\max}$  — абсцисса точки перегиба. Таким образом, в левой части мы получаем некое параметрическое число, скажем  $\alpha$ , и проблема сводится к решению уравнения  $f(y) = a$ .

Нетрудно показать, что  $S/\alpha$  есть действующая длина ореола  $X$ . Следовательно, (13) может быть придан наглядный вид:

$$X/x_{\max} = f(y). \quad (14)$$

Отношение длины ореола к абсциссе точки перегиба есть функция исключительно  $y$ , т. е. определяет избыточную температуру  $T_0$ .

После этого нетрудно из (10) получить и энергию активации

$$E = R\alpha T_\infty [(1+y)/y]. \quad (15)$$

Хотя (14) и (15) решают поставленную задачу, практически мы сталкиваемся с необходимостью определить асимптотическое значение критерия Фурье  $F_{0\infty}$  — весьма малую величину, которую получить из измерений невозможно. Поэтому (14) пригодно лишь для приближенных оценок температур и для наглядного сравнения двух ореолов. Для получения  $E$  необходим другой подход.

Второй подход. Деля (11) на (12), после преобразований получаем выражение

$$\beta/2\gamma x_{\max} = (y-1)/(y+1) \cdot \ln y^{-1} = \varphi(y). \quad (16)$$

Здесь левая часть равенства снова состоит из измеримых величин  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $x_{\max}$ , в то время как правая есть функция только избыточной температуры. После определения последней  $E$  может быть получено из формулы

$$E = 2R\beta T_\infty (y+1)/(y-1). \quad (17)$$

Для удобства на рис. 3 приведен график функции  $\varphi(y)$ .

Поясним изложенное на численном примере ореола экзоконтактовых аргоновых концентраций в биотитах района Фронт Рейндж (Колорадо) (4) (рис. 4).

Непосредственно из графика видно, что перегиб имеет место при  $x_{\max} = 1,8$  км. Далее,  $\ln(F_{0x}/F_{0x_{\max}}) = 3,7$ , а наклон касательной в точке перегиба равен  $\beta = 2,18 \text{ км}^{-1}$ . Подставляя эти величины в (16), получим  $\varphi(y) = 0,471$ , а по графику рис. 3 определим  $y \approx 2,5$ . Следовательно, если предположить  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ , то в приконтактовой области имела место температура

$$T_{x=0} = 3,5 \cdot 300 = 1050^\circ \text{K}, \text{ или } 780^\circ \text{C}.$$

Энергия активации, в силу (17), имеет весьма низкое значение  $\sim 9,5$ .

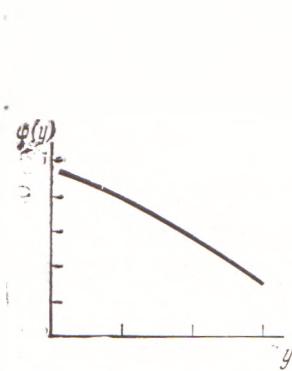


Рис. 3

Рис. 3. График функции  $\varphi(y)$ , необходимой для расчета  $T_0$  при помощи формулы (16). Начала отсчета по оси абсцисс от 1,0, цена деления 1,0; по оси ординат — от 0,4, цена деления 0,02

Рис. 4. Ореол  $Ar^{40}/K$  в биотитах экзоконтакта диоритовой интрузии и гранитов района Фронт Рейндж (по <sup>(4)</sup>). 1, 2 — биотит (1 — экспериментальные точки, 2 — точки слаженной кривой); 3 — роговая обманка, экспериментальные точки; 4 — значения  $lg(F_{0x}/F_{0\infty})$

· 10,0 ккал/моль. Такие же аномально низкие величины нами получены для биотита данного ореола в работе <sup>(1)</sup> совершенно отличными методами. О причинах этого явления пока можно строить лишь догадки.

В то же время, можно сопоставить энергии активации биотита (индекс 1) и роговой обманки (индекс 2) из того же ореола, исходя из (11):

$$E_2/E_1 = \beta_2/\beta_1. \quad (18)$$

Если на расстоянии 1,8 км от контакта для биотита имеет место 30% потери аргона, то для роговой обманки потери не превосходят 1% (см. рис. 4). Отсюда нетрудно получить, что

$$E_2 \geq (3/4)E_1 = 30/40 \text{ ккал/моль.}$$

Таким образом, энергия активации для роговой обманки по порядку величины приближается к значениям, полученным в работах <sup>(1, 4)</sup>, а именно 40÷52 ккал/моль.

Основной предпосылкой применения развитых методов является наличие детализированных данных по контактовым ореолам концентрации радиогенных веществ.

Институт земной коры  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Иркутск

Поступило  
8 V 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> С. Б. Брандт, Н. В. Волкова, В. А. Утенков, Ежегодник Инст. геохимии Сиб. отд. АН СССР, 1971, Новосибирск, 1972, стр. 83. <sup>2</sup> С. Б. Брандт, В. И. Коваленко и др., Изв. АН СССР, сер. геол., № 1 (1967). <sup>3</sup> А. В. Лыков, Теория теплопроводности, М., 1952. <sup>4</sup> S. R. Hart, J. Geol., v. 72, № 5 (1964).