

УДК 553.2

ПЕТРОГРАФИЯ

П. П. ЗОЛОТАРЕВ, В. Н. ШАРАПОВ, В. С. ГОЛУБЕВ

К ДИНАМИКЕ ОХЛАЖДЕНИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ НЕНАСЫЩЕННЫХ ЛЕТУЧИМИ МАГМ

(Представлено академиком Ю. А. Кузнецовым 21 IV 1972)

Считается (⁸, ¹¹), что обычно интродуцируются преимущественно ненаасыщенные летучими магмы. В процессе их кристаллизации при наличии ряда условий охлаждения происходит постепенное насыщение расплава летучими и снижение по мере кристаллизации температуры солидуса (⁶, ⁷, ¹³). Динамика охлаждения магматических тел в таком случае отличается от рассмотренной ранее (⁵, ¹⁰, ¹²), так как необходимо учитывать диффузию летучих в расплаве из зоны кристаллизации.

Благодаря этому содержание летучих в расплаве увеличивается со временем вплоть до полного его насыщения. В качестве первого приближения в описании динамики данного явления ниже приводится решение задачи затвердевания полубесконечного интрузива без учета свободной конвекции в магме.

Пусть в начальный момент $t = 0$ магматический расплав занимает область $0 \leq x \leq \infty$, а породы, имеющие температуры θ_0 , меньшую температуры солидуса расплава, — область $-\infty \leq x \leq 0$. Зона затвердевания расплава будет распространяться со временем в полупространство $x > 0$, причем летучие удаляются из этой зоны в расплав посредством диффузии. Требуется определить распределение температуры $T_1(x, t)$, $T_2(x, t)$, $\theta(x, t)$ кристаллической коры, расплава и пород соответственно, а также концентрации $C(x, t)$ летучего в расплаве.

Искомые функции находятся путем решения уравнений теплопроводности к диффузии (²):

$$\partial T_1 / \partial t = a_1 \partial^2 T_1 / \partial x^2, \quad 0 \leq x \leq l(t), \quad (1)$$

$$\partial T_2 / \partial t = a_2 \partial^2 T_2 / \partial x^2, \quad l(t) \leq x \leq \infty, \quad (2)$$

$$\partial \theta / \partial t = a \partial^2 \theta / \partial x^2, \quad -\infty \leq x \leq 0, \quad (3)$$

$$\partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial x^2, \quad l(t) \leq x \leq \infty, \quad (4)$$

при следующих начальных условиях и условиях на бесконечности

$$\begin{cases} T_2(x, 0) = T_2(\infty, t) = T_0, & \theta(-\infty, t) = \theta_0, \\ C(x, 0) = C(\infty, t) = C_0, \end{cases} \quad (5)$$

а также граничных условиях на $x = 0$ и на границе фазового перехода $x = l(t)$ (²):

$$\begin{cases} \theta(0, t) = T_1(0, t) = \theta_0; & \lambda \partial \theta / \partial x|_{x=0} = \lambda_1 \partial T_1 / \partial x|_{x=0}; \\ T_1(l, t) = T_2(l, t) = T^0; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=l} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=l} = \rho Q \frac{dl}{dt}; & \frac{dl}{dt} = - \frac{D}{C(l, t)} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=l}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь a , a_1 , a_2 — коэффициенты температуропроводности породы, кристаллической коры и расплава; λ , λ_1 , λ_2 — их коэффициенты теплопровод-

ности; D — коэффициент диффузии летучего в магме; ρ , Q — плотность и теплота кристаллизации расплава. Четвертое и пятое равенства в (6) выражают условия сохранения тепла и массы на границе фазового перехода $x = l(t)$ ⁽²⁾.

Между концентрацией летучего на границе фазового перехода и температурой затвердевания магмы имеет место определенная функциональная зависимость:

$$T^0 = f[C(l, t)]. \quad (7)$$

Для упрощения последующих выкладок разложим функцию f в ряд Тейлора по степеням C и, ограничиваясь первыми членами ряда, получим зависимость, аналогичную закону Рауля для идеального раствора ⁽⁴⁾:

$$T^0 = T^*[1 - kC(l, t)], \quad (8)$$

где T^* — температура солидуса «сухого» расплава, k — постоянная величина.

Решение задачи может быть представлено в виде ⁽²⁾:

$$T_i(x, t) = E_i + F_i \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{a_i t}), \quad i = 1, 2, \quad (9)$$

$$\theta(x, t) = \varepsilon + F \operatorname{erfc}(-x/2\sqrt{a t}), \quad (10)$$

$$C(x, t) = A + B \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{D t}), \quad (11)$$

$$l(t) = 2\sqrt{\alpha t},$$

$$\left(\operatorname{erfc} \xi = 1 - \operatorname{erf} \xi, \quad \operatorname{erf} \xi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-y^2} dy \right) \quad (12)$$

Постоянные интегрирования находим, удовлетворяя (9)–(11) условиям (5), (6) (8):

$$\begin{aligned} A = C_0, \quad B &= \frac{C_0 \sqrt{\pi \alpha / D}}{\exp(-\alpha/D) - \sqrt{\pi \alpha / D} \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha/D})}, \\ E &= \theta_0, \quad E_2 = T_0, \quad E_1 = \theta_0 - \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{a_1}}\right) F_1, \\ F &= -\frac{\lambda_1}{\lambda} \sqrt{a/a_1} F_1, \quad F_1 = -\frac{T^*(1 - kC_0) - \theta_0 - T^* k B \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha/D})}{\operatorname{erf}(\sqrt{\alpha/a_1}) + (\lambda_1/\lambda) \sqrt{\alpha/a_1}}, \\ F_2 &= \frac{T^*(1 - kC_0) - T_0 - T^* k B \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha/D})}{\operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha/a_2})}. \end{aligned}$$

Величина α определяется из последнего условия в (6):

$$\begin{aligned} \frac{\rho Q a_2}{\lambda_2 T^*} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{a_2}} &= \frac{[1 - kC_0 - T^0/T^* - k B \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha/D})] \exp(-\alpha/a_2)}{\operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha/a_2})} + \\ &+ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \frac{[1 - kC_0 - \theta_0/T^* - k B \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha/D})] \exp(-\alpha/a_1)}{\operatorname{erf}(\sqrt{\alpha/a_1}) + (\lambda_1/\lambda) \sqrt{\alpha/a_1}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Если в решении положить $D = 0$, то оно будет аналогичным полученному Егером ⁽¹²⁾. При пренебрежении диффузионным сопротивлением, когда $D \rightarrow \infty$, можно получить соотношения, которые характеризуют равновесную кристаллизацию, изученную экспериментально ⁽¹³⁾. Для тел конечных размеров решение сформулированной выше задачи может быть дано при помощи численных методов. В частности, для равновесной кристаллизации это было выполнено нами ⁽⁵⁾.

Эффективность процесса насыщения зависит от величины коэффициента диффузии. Насыщение расплава летучими, в свою очередь, приводит к более медленному остыванию расплава из-за появления перегрева относительно начального значения T^* . Учитывая это соотношение, для тел ко-

нечных размеров можно оценить порядок значения D , при котором процесс насыщения протекает эффективно. Эти вычисления можно сделать по уравнению (13), задав величины α для учтенных случаев перегревов расплава, которые соответствуют определенным значениям C_0 и $l(t)$ для тел конечных размеров (⁵, ¹⁰, ¹²).

Расчет показывает, что для эффективного протекания процесса кристаллизации D должно быть порядка 10^{-5} см²/сек. Эти значения D для воды в силикатных расплавах реализуются при протекании диффузии путем трансляции протона (¹).

Из полученных решений можно указать некоторые петрологические следствия:

1. Изменение температуры кристаллизации ненасыщенных летучими магм связано с диффузионным потоком летучих из зоны затвердевания расплава внутрь магматического тела.

2. Наиболее эффективно этот процесс может протекать в несколько перегретых эвтектидных магмах, где зона затвердевания в пространстве относительно невелика.

3. Чтобы данный процесс протекал в заметных масштабах, начальное содержание воды в расплаве должно быть порядка 2% по весу. Если учесть кристаллизационную и поровую воду, то в этом случае из зоны затвердевания в расплав может диффундировать некоторое количество воды.

4. Более полно и эффективно процесс диффузии в кристаллизующейся магме должен протекать с увеличением глубины становления плутона. С повышением давления увеличивается растворимость воды в магмах, и на больших глубинах плутоны охлаждаются медленнее из-за более высоких начальных температур вмещающих пород.

5. Признаком проявления диффузии летучих внутрь граптоидного интрузива при затвердевании магмы является наличие в нем зональности — увеличение от периферии к центру все более лейкократовых разновидностей гранитных пород. Применение геотермометров при этом фиксирует снижение T солидуса. Такого рода плутоны потенциально рудопосны.

Поступило
23 III 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ О. А. Есин, П. В. Гельд, Физико-химия пирометаллургических процессов, М., 1966. ² П. П. Золотарев, Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 3 (1966). ³ А. А. Радик, Н. И. Хитаров, Геохимия, № 6 (1968). ⁴ В. А. Кириллин, А. А. Шнейдлин, Термодинамика растворов, М.—Л., 1956. ⁵ В. Г. Меламед, В. Н. Шарапов, ДАН, 202, № 4 (1972). ⁶ И. А. Островский, Изв. АН СССР, сер. геол., № 5 (1952). ⁷ Ф. Г. Смит, Физическая геохимия, М., 1968. ⁸ В. С. Соболев и др., Геология и геофизика, № 4 (1970). ⁹ Справочник по физическим константам горных пород, М., 1969. ¹⁰ П. Н. Шарапов, В. Г. Меламед, Геология и геофизика, № 6 (1966). ¹¹ Д. С. Штейнберг и др., В кн. Проблемы петрологии и геохимии гранитоидов, Свердловск, 1971. ¹² J. Jager, Am. J. Sci., 255 (1957). ¹³ R. H. Jans, C. W. Burnham, Ecol. Geol., 64, № 8 (1969).