

В. Г. МЕЛАМЕД, В. Н. ШАРАПОВ

**К ДИНАМИКЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ИНТРУЗИВОВ
ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАГМЫ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР**

(Представлено академиком Ю. А. Кузнецовым 4 I 1971)

Как известно ⁽¹⁾, наиболее общим случаем кристаллизации магм является тип вязкого затвердевания с двумя температурными волнами кристаллизации. Первая из них отвечает температуре ликвидуса или любой точке в интервале температур солидус — ликвидус, а вторая — температуре солидуса. В петрологических приложениях при изучении динамики кристаллизации интрузива пока применялась лишь классическая задача Стефана ^(3, 7, 8), описывающая плавление и затвердевание эвтектик. Из экспериментального изучения металлических слитков выяснено, что динамика затвердевания эвтектик и расплавов, имеющих интервал кристаллизации, существенно различна ⁽⁵⁾. Поэтому при исследовании динамики охлаждения внедренных магматических масс возникает естественный вопрос о сопоставлении хотя бы простейших аналитических моделей кристаллизации интрузивов, состоящих из магм данных типов, с целью выяснения следующих основных генетических моментов: 1) различие скоростей затвердевания; 2) различие в динамике температур в коре интрузива и за ее пределами; 3) различия в масштабах контактового изохимического метаморфизма. Аналитически процесс кристаллизации данных типов магм сейчас может быть изучен лишь без учета свободной конвекции и «сбрасывания» летучих на фронте кристаллизации или до появления кристаллической коры.

Аналитическая формулировка и методы решения классической задачи Стефана для петрологических приложений указывались Егером ^(8, 9) и позднее нами ^(3, 7). Для случая вязкого затвердевания расплава математическая запись задачи, в отличие от классической постановки, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad \xi(t) < x < 1/2 l, \quad (1)$$

$$c_2(T_2) \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \right], \quad 0 < x < \xi(t), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_3(x, t)}{\partial t} = a_3^2 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, \quad x > 1/2 l, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi(t)} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi(t)} = \rho Q^* \xi'(t), \quad T_1[\xi(t), t] = T_2[\xi(t), t] = T^*, \quad (4)$$

$$T_2(x, 0) = T_2^0, \quad 0 < x < 1/2 l; \quad T_3(x, 0) = T_3^0, \quad x > 1/2 l; \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0,$$

$$\xi(0) = 1/2 l.$$

Здесь $x = 0$ — ось симметрии (центр трещины), l — ширина трещины, $\xi(t)$ — подвижная граница раздела магма — кора, T_2^0 , T_3^0 — начальные температуры магмы и вмещающих пород, $T_2^0 > T^* > T_3^0$; T^* — температура солидуса. Индексы 1 и 2 относятся к интрузиву (1 — кора, 2 — магма), индекс 3 — к внешней области (вмещающие породы), a_i^2 , λ_i — температуропроводность и коэффициент теплопроводности; $C_2(T)$, $T^* < T < T^{**}$ — эффективная (с учетом фазовых превращений в интервале кри-

сталлизации ΔT) теплоемкость магмы, $c_2(T) = \rho \frac{dQ(T)}{dT} + \bar{c}_2$, где ρ — плотность, \bar{c}_2 — аддитивная теплоемкость, $Q(T)$ и Q^* — соответственно теплота кристаллизации при непрерывном затвердевании в интервале температур ΔT и при дискретном при $T = T^*$, $\Delta T = T^{**} - T^*$, T^{**} — температура ликвидуса. Очевидно, что в случае эвтектики $Q(T) \equiv 0$ и уравнение (2) становится линейным.

Ниже рассматривается случай линейного измерения $Q(T)$ при $T^* < T < T^{**}$, $Q(T) = Q + \frac{T - T^*}{\Delta T} Q^0$, где Q^0 — общие фазовые переходы при вязком затвердевании в интервале ΔT . При этом $c_2(T) \equiv \text{const} = \bar{c}_2 + \rho Q^0 (\Delta T)^{-1}$. При $T > T^{**}$ $c_2(T) \equiv \bar{c}_2$. Для иллюстрации сравним скоро-

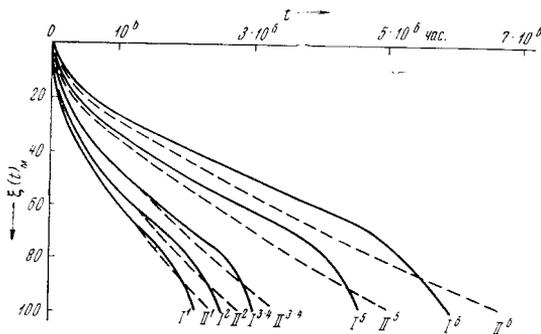


Рис. 1

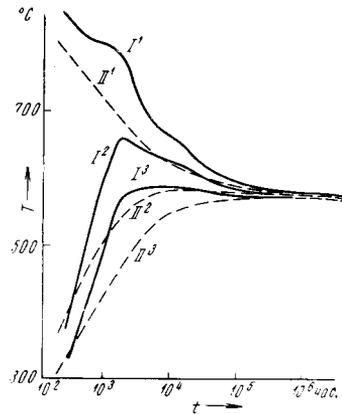


Рис. 2

Рис. 1. Динамика затвердевания магмы во времени при различных типах кристаллизации. I — кристаллизация магмы в интервале температур, II — эвтектическая кристаллизация. Индексы: $I-3 - T_2^0 = 825^\circ$, T_3^0 соответственно 50 ; 150 ; 250 ; $4-6 - T_2^0 = 900^\circ$ и соответственно 50 ; 250 ; 350°

Рис. 2. Ход изменения температуры вблизи контакта во времени при различных типах кристаллизации. I — кристаллизация магмы в интервале температур, II — эвтектическая кристаллизация $T_3^0 = 150^\circ$, $T_2^0 = 900^\circ$. Индексы: 1 — магма у контакта, 2 — контакт интрузива и магмы; 3 — вмещающая порода у контакта

сти кристаллизации магм для указанных двух типов кристаллизации при условиях $T^* = 750^\circ \text{C}$; $T^{**} = 850^\circ \text{C}$, $l = 200 \text{ м}$, $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$, $Q^* = 20 \text{ ккал/кг}$, $Q^0 = 60 \text{ ккал/кг}$, $\lambda_2 = 0,86 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$, $\lambda_1 = 1,73 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$, $\lambda_3 = 1,5 \text{ ккал/м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}$, $c_1 = \bar{c}_2 = c_3 = 490 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}$, $c_2(T) = 1810 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}$, $T_2^0 = 900^\circ \text{C}$; 825°C , $T_3^0 = 50$; 150 ; 250 ; 350°C . В соответствующих случаях эвтектики при $T_2^0 = 900^\circ \text{C}$ $Q^* = 80 \text{ ккал/кг}$, при $T_2^0 = 825^\circ \text{C}$ $Q^* = 65 \text{ ккал/кг}$. Поскольку рассматриваемая задача является однофронтной, причем подвижная граница раздела магма — кора движется монотонно, решение поставленных задач осуществлялось на ЭВМ БЭСМ-4 в Вычислительном центре Московского университета по методу «ловли фронта в узел сетки» (2). В случае, если необходимо учесть также метаморфические превращения боковых пород, решение проводится совершенно аналогично. При этом уравнение (3) заменяется соответствующими уравнениями типа (2).

Отметим наиболее существенные результаты решения данной задачи. На рис. 1 показаны зависимости скоростей перемещения фронта затвердевания от типа кристаллизации и начальных температур магмы и вмещающих пород. Видно, что в начальные моменты охлаждения скорость кристаллизации расплавов, имеющих разный тип затвердевания, или практически одинакова, или несколько выше в случае эвтектики. Однако в ко-

нечные моменты (20—30% от общего времени кристаллизации интрузива) скорость кристаллизации эвтектики существенно меньше, чем затвердевание магмы в интервале температур. Поэтому при прочих равных условиях общее время кристаллизации магмы интрузива по типу эвтектики больше на 10—20%, чем при ее затвердевании в интервале температур. Различия в скоростях затвердевания увеличиваются с возрастанием температуры вмещающих пород или перегреве расплава. На рис. 2 показана динамика температур в области контакта интрузива и вмещающих пород. Видно, что при затвердевании расплава в интервале температур на контакте в начальные моменты охлаждения расплава есть тепловая волна. Природа ее появления была объяснена нами в (7). Период резкой нестационарности температуры контакта мал в сравнении с общим временем кристаллизации плутона. В условиях стабилизированного теплообмена температура контакта в случае перегретых и неперегретых магм, кристаллизующихся по типу эвтектики, в сравнении с эвтектической кристаллизацией различна. Интрузивы с неперегретой магмой, затвердевающей в интервале температур, имеют более низкую температуру (на 30—70°), чем при кристаллизации расплава по типу эвтектики. Все типы перегретых расплавов при затвердевании характеризуются близкими температурами в области контакта с вмещающими породами.

Масштабы контактового метаморфизма меньше в случае кристаллизации магмы в интрузиве в интервале температур, чем в случае эвтектики.

Поступило
21 VII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Н. Заварицкий, Введение в петрохимию, Изд. АН СССР, 1944. ² П. Ф. Васильев, ДАН, 157, № 6 (1964). ³ В. А. Кудрявцев, В. Г. Меламед, В. Н. Шарапов, Геология и геофизика, № 12 (1967). ⁴ В. А. Кудрявцев, В. Г. Меламед, В. Н. Шарапов, ДАН, 178, № 5 (1968). ⁵ J. Paggel, Кристаллизация отливок, Новосибирск, 1960. ⁶ Справочник физических констант горных пород, М., 1969. ⁷ В. Н. Шарапов, В. Г. Меламед, Геология и геофизика, № 6 (1966). ⁸ J. C. Gager, Am. J. Sci., 255, № 4, 306 (1957). ⁹ J. C. Gager, Am. J. Sci., 257, № 1, 44 (1959).