

УДК 551.251

ПЕТРОГРАФИЯ

В. Г. МЕЛАМЕД, В. В. РЕВЕРДАТТО, В. Н. ШАРАПОВ

# АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ ИЗОХИМИЧЕСКОГО КОНТАКТОВОГО МЕТАМОРФИЗМА

(Представлено академиком В. С. Соболевым 6 VII 1970)

Исследования интенсивности, темпа и продолжительности прогрева боковых пород внедрившимися магматическими массами интересны для целого ряда приложений теоретической и прикладной геологии. Однако до сих пор систематически эти вопросы не рассматривались. Известные аналитические решения (<sup>1, 3, 5, 6, 12, 13</sup>) касались лишь отдельных моментов проблемы или не выходили за рамки решения уравнения Фурье, где не учитываются существенные факторы процесса. В данном сообщении приводятся основные результаты аналитического изучения факторов наиболее типичного случая метаморфизма боковых пород, при их нагреве интрузивом, при отсутствии существенного изменения химического состава (изохимический метаморфизм). Минералогические ассоциации и фации контактового метаморфизма освещены в монографии (<sup>2</sup>). Учитывая обобщенные в ней данные по условиям развития изохимического метаморфизма, следует отметить ряд факторов, важных при последующей постановке и решении задачи: 1) температуры развития изохимического контактового метаморфизма обычно выше 400° С; 2) метаморфические реакции протекают в некотором интервале температур.

Имея в виду данные по температурам солидуса магм разного состава (<sup>2</sup>), можно ожидать, что температура контакта кристаллизующегося интрузива меняется от 500—550° до 800° (<sup>6, 10</sup>). Поскольку нас интересует метаморфизм вмещающих пород, будем решать «внешнюю» задачу при условии, что температура контакта интрузива ( $x = 0$ ) остается в первом приближении на одном уровне в случае эвтектического типа кристаллизации (<sup>10</sup>) (при вязком затвердевании, когда происходит контактовый метаморфизм, это условие также выполняется (<sup>8</sup>)).

Таким образом, общая формулировка задачи о динамике изохимического контактового метаморфизма может быть записана следующим образом: найти температуру вмещающих пород  $T(x, t)$  и скорость перемещения фронта метаморфизма  $\xi(t)$  из следующей системы уравнений:

$$c_1 \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right] - f(T) \frac{\partial T_1}{\partial t}, \quad 0 < x < \xi(t); \quad (1)$$

$$\partial T_2(x, t) / \partial t = a^2 \partial^2 T_2 / \partial x^2, \quad x > \xi(t); \quad (2)$$

$$T_1[\xi(t), t] = T_2[\xi(t), t] = T^*, \quad T_1(0, t) = T_0, \quad T_2(x, 0) = T_{00}, \quad (3)$$

$$\lambda_2 \partial T_2 / \partial x|_{\xi(t)} - \lambda_1 \partial T_1 / \partial x|_{\xi(t)} = Q \xi'(t), \quad t > 0; \quad \xi(0) = 0.$$

Здесь  $T_i(x, t)$ ,  $i = 1, 2$  — температуры соответственно метаморфизованных и неизмененных пород;  $\lambda_i$ ,  $c_i$  — их теплопроводность и теплоемкость ( $a^2 = \lambda / c$ );  $Q$  — теплота реакций контактового метаморфизма, происходящих при  $T = T^*$ ;  $f(T)$  — скорость стока тепла при метаморфизме в диапазоне  $T > T^*$  (при  $T \leq T^*$   $f(T) \equiv 0$ ),  $T_0$  — температура контакта,  $T_{00}$  — начальная температура боковых пород. Указанная задача является автомодельной и при произвольной непрерывной  $f(T)$  сводится к краевой

задаче для системы двух нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка со «склеенным» при  $T = T^*$  решением (7).

Поскольку закон  $f(T)$  для интересующих нас реакций неизвестен\*, в решении принят линейный сток внутри некоторого интервала  $[T^*, T^{**}]$ , где  $T_{00} < T^* < T^{**} < T_0$ . При этом задача существенно упрощается, так как  $f(T)$  является ступенчатой функцией ( $f(T) \equiv \text{const} > 0$  при  $T^* < T < T^{**}$ ,  $f(T) \equiv 0$ ,  $T \leq T^*$ ,  $T > T^{**}$ ), и уравнение для  $T_1$  разбивается на два:

$$\partial \bar{T}_1 / \partial t = \bar{a}_1^2 \partial^2 \bar{T}_1 / \partial x^2, \quad 0 < x < y(t); \quad (4)$$

$$\partial \bar{T}_1 / \partial t = \bar{a}_1^2 \partial^2 \bar{T}_1 / \partial x^2, \quad y(t) < x < \xi(t); \quad (5)$$

$$\bar{T}_1[y(t), t] = \bar{T}_1[y + t], t] = T^{**}, \quad \lambda_1 \partial \bar{T}_1 / \partial x|_{y(t)} = \lambda_1 \partial \bar{T}_1 / \partial x|_{y(t)}. \quad (6)$$

Здесь  $\bar{T}_1$ ,  $\bar{T}_1$  — соответственно температура полностью метаморфизованных и метаморфизирующихся пород;  $y(t)$  — граница зоны полного метаморфизма;  $c_1$  — теплоемкость с учетом реакции метаморфизма (аддитивная теплоемкость  $c_1 + f(T)$ ).

Задача (2)–(6) сводится к системе двух трансцендентных алгебраических уравнений относительно неизвестных констант  $\alpha$  и  $\beta$ , где  $\alpha = y(t) / \sqrt{t}$ ,  $\beta = \xi(t) / \sqrt{t}$ , причем температура в каждой зоне непосредственно определяется через  $\alpha$ ,  $\beta$  и краевые условия. Для удобства сделаем замену  $u = T - T^*$  (при этом  $u[\xi(t), t] = 0$ ). Тогда  $\alpha$  и  $\beta$  определяются из решения системы

$$\frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{a}_1} \frac{T_0 - T^{**}}{\text{erf}[\alpha/(2\bar{a}_1)]} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{4\bar{a}_1^2}\right) = \frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{a}_1} \frac{T^{**} - T^*}{\text{erf}[\alpha/(2\bar{a}_1)] - \text{erf}[\beta/(2\bar{a}_1)]}; \quad (7)$$

$$\frac{\lambda_2}{a_2} \frac{T_{00} - T^*}{1 - \text{erf}[\beta/(2a_2)]} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a_2^2}\right) - \frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{a}_1} \frac{T^{**} - T^*}{\text{erf}[\alpha/(2\bar{a}_1)] - \text{erf}[\beta/(2\bar{a}_1)]} \exp\left[-\frac{\beta^2}{4\bar{a}_1^2}\right] = Q \frac{\sqrt{\pi}}{2} \beta. \quad (8)$$

Из (7) и (8) в силу  $T_0 > T^{**} > T^* > T_{00}$  имеем  $\alpha < \beta$ , т. е. зона неполностью измененных пород с течением времени увеличивается. Решение отыскивалось с помощью ЭВМ при условиях  $T_0 = 600^\circ$ ,  $T_{00} = 50, 150, 250^\circ$ ;  $T^* = 400^\circ$ ;  $T^{**} = 450^\circ$ ;  $c_1 = 500$  ккал/(м<sup>3</sup>·град);  $c_1 = c_2 = 418$  ккал/(м<sup>3</sup>·град);  $\bar{\lambda}_1 = 1,7$  ккал/(м·час·град);  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1,2$  ккал/(м·час·град).

Рассматривалось два типа стока тепла при  $T^*$  и в диапазоне  $\Delta T = T^* - T^{**}$ :

I.  $Q(T^*) = 10$  кал/г;  $Q(\Delta T) = 60$  кал/г;

II.  $Q(T^*) = 60$  кал/г;  $Q(\Delta T) = 10$  кал/г.

Кроме того, исследованы и такие случаи (рис. 1а):  $Q(T^*) = 40, 80, 120, 160$  кал/г;  $Q(\Delta T) = 10, 20, 30, 40$  кал/г. Поскольку изменения  $\alpha$  и  $\beta$  близки к линейным, можно указать приближенную зависимость изменения ширины зоны контактового метаморфизма от увеличения начальной  $T$  вмещающих пород. Возрастание  $T$  на один градус увеличивает ширину зоны контактового метаморфизма на  $\approx 115 \cdot 10^{-4}$  ее мощности при  $T_{00} = T_{00} - 1^\circ \text{C}$ .

\* В строгой постановке задачи динамики контактового метаморфизма выписанная система уравнений должна быть дополнена уравнением кинетики. Поскольку кинетические уравнения для интересующих нас реакций не известны, мы вынуждены в качестве первого приближения считать, что скорость метаморфизма соответствует скорости температурных изменений при прогреве пород.

Зависимость ширины зоны контактового ореола от характера стока тепла при метаморфизме является следующей. Если метаморфизм пород протекает таким образом, что при начальной температуре имеется быстрое превращение некоторой части породы (в элементарном объеме), а остальная ее часть претерпевает изменение в интервале температур по линейному закону, то ширина области, где превращение произошло неполностью, тем больше, чем меньше сток тепла при начале метаморфических реакций. Ширина зоны полностью метаморфизованных пород мало зависит от ха-

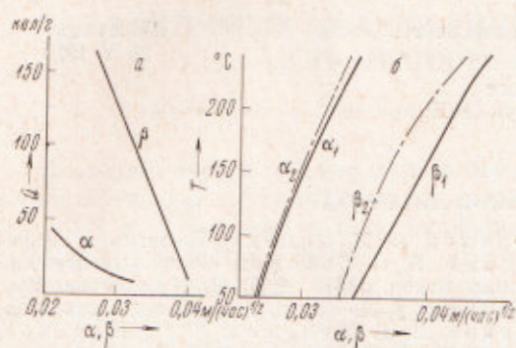


Рис. 1

Рис. 1. а — изменение масштабов метаморфизма в зависимости от величины стоков тепла при метаморфизме;  $Q(T^*)$  меняется от 40 до 160 кал/г,  $Q(\Delta T)$  от 10 до 40 кал/г;  $T_{00} = 150^\circ$ . б — изменение скорости перемещения фронтов частично метаморфизованных ( $\beta_1, \beta_2$ ) и полностью преобразованных ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) пород в зависимости от характера стока тепла при реакции и начальной температуры вмещающих пород. Индексы соответствуют типу стока

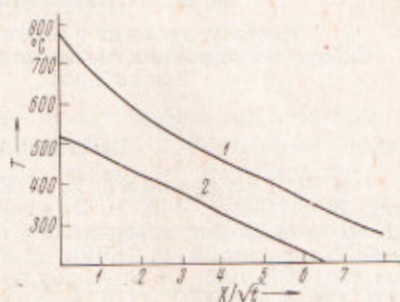


Рис. 2

Рис. 2. Масштабы контактового метаморфизма в зависимости от температуры в экзоконтакте интрузива для случая протекания реакции при фиксированной температуре ( $500^\circ$ ), величине стока тепла 50 кал/г,  $T_{00} = 50^\circ$ . 1 — распределение  $T$  в окрестности остывающих ультраосновных интрузивов, 2 — гранитоидных,  $X$  — в м,  $t$  — в годах

рактера метаморфических реакций ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  на рис. 1б). С течением времени разница в мощностях области неполностью измененных пород может достигнуть существенных величин (сотни метров для времен порядка сотен тысяч лет). Из решения задачи следует еще один важный вывод: число метаморфических зон в пределах контактового ореола несущественно влияет на характер распределения температуры в окрестностях интрузива и на мощность ореола в целом для относительно больших временных интервалов контактового метаморфизма.

Укажем еще одно полезное приложение из решения общей задачи изохимического контактового метаморфизма. Динамику развития процесса можно в первом приближении описать и более простой постановкой задачи типа классической задачи Стефана, для которой имеются аналитические решения, если учесть лишь зону полностью метаморфизованных пород или сток при фиксированной температуре, отвечающей средней  $T$  для интервала, в котором осуществляется данная метаморфическая реакция. Таким образом, мы охарактеризовали область развития контактового метаморфизма в зависимости от  $T$  кристаллизации магм (рис. 2) от гранитных до ультраосновных. Автомодельность позволяет описать процесс для выбранных начальных и граничных условий ( $T_{00} = 50^\circ$ ,  $Q = 50$  кал/г) в течение любого промежутка времени. Данные рис. 1 можно трансформировать для любого варианта  $Q$  и  $T_{00}$ . Нами не рассматривалось влияние изменения физических параметров для большого класса пород, в расчетах учтены лишь их характерные типы. Судя по (11), поправка здесь не столь существенна, чтобы значительно сказаться на ширине зоны метаморфизма в сравнении с полученными результатами. Но при детальном исследова-

ниях, естественно, эти поправки необходимо учитывать. Полученные зависимости в реальных условиях вскрываются через величину критерия Ингерсолла (<sup>10</sup>), который может служить показателем глубины формирования интрузивов, залегающих в породах сходного состава.

Следует подчеркнуть, что полученные зависимости отвечают лишь преобладанию кондуктивного прогрева вмещающих пород. Если устанавливается проявление конвекции (признаки метасоматоза), задача динамики метаморфизма должна решаться в другой постановке.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Поступило  
29 V 1970

Институт геологии и геофизики  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Новосибирск

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> М. Н. Годлевский, Е. С. Кравцов, В. М. Сливко, Геология и геофизика, № 2 (1962). <sup>2</sup> А. Н. Заварицкий, В. С. Соболев, Физико-химические основы петрографии изверженных горных пород, 1961. <sup>3</sup> Д. Н. Казанли, Изв. КазССР, сер. геол., в. 11 (1949). <sup>4</sup> Г. Карслоу, Д. Егер, Теплопроводность твердых тел, ИЛ, 1965. <sup>5</sup> В. А. Кудрявцев, В. Г. Меламед, В. Н. Шарапов, ДАН, 178, № 5 (1968). <sup>6</sup> В. А. Кудрявцев, В. Г. Меламед, В. Н. Шарапов, Геология и геофизика, № 4 (1970). <sup>7</sup> В. Г. Меламед, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 2 (1963). <sup>8</sup> В. Г. Меламед, В. Н. Шарапов, ДАН (в печати). <sup>9</sup> В. В. Ревердатто, Фации контактового метаморфизма, М., 1970. <sup>10</sup> В. Н. Шарапов, В. Г. Меламед, Геология и геофизика, № 6 (1966). <sup>11</sup> Handbook of Physical Constant, Rev. Ed. S. K. Clarc, Geol. Soc. Am. Memoir, 97, 1967. <sup>12</sup> Y. C. Yager, Am. J. Sci., 257 (1959). <sup>13</sup> T. S. Lovering, Bull. Geol. Soc. Am., 47, № 31 (1936).