

В. И. КОВАЛЕНКО, И. Л. ЛАПИДЕС

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ДАЙКИ ТОПАЗСОДЕРЖАЩИХ КВАРЦЕВЫХ КЕРАТОФИРОВ (ОНГОНИТОВ)

(Представлено академиком Д. С. Коржинским 13 XI 1972)

В дайке топазсодержащих кварцевых кератофиров (онгонитов) из Монголии (¹) установлена четкая зависимость содержаний вкрапленников альбита, микроклина и кварца, а также их размеров и количества зерен (центров кристаллизации) от степени закристаллизованности пород (рис. 1). Степень закристаллизованности данных порфировых пород, вероятнее всего, определяется временем кристаллизации расплава, под которым подразумевается тот интервал времени (Δt), в течение которого происходит понижение температуры расплава на ΔT (здесь и далее $^{\circ}\text{C}$) ниже температуры кристаллизации. При быстром охлаждении расплава (Δt мало), в силу экспоненциальной зависимости скорости роста кристаллов от вязкости для силикатных систем и вязкости от температуры (²), образуются слабо закристаллизованные стекловатые или микрокристаллические породы (в частности, зоны закалки в эндоконтактах дайки онгонитов). С ростом Δt (например, при переходе к центральным частям дайки) степень кристалличности пород возрастает. В предельном случае образуются полнокристаллические интрузивные породы. Задаваясь правдоподобными с геологической точки зрения теплофизическими константами пород, температурой расплава и вмещающих пород, а также ΔT , мы оценивали Δt при решении уравнения теплопроводности для остывающей дайки без учета зависимости констант от температуры и пренебрегая теплоотой кристаллизации расплава (³).

Одновременно анализировался и другой вероятный механизм кристаллизации расплава в трещине, рассматриваемый при решении так называемой задачи Стефана (³, ⁴), при котором учитывается фазовый переход расплав — твердая фаза. Для первой модели Δt оценивался при значениях: коэффициента температуропроводности $a = 3 \cdot 10^{-5} - 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{мин}$ (⁵);

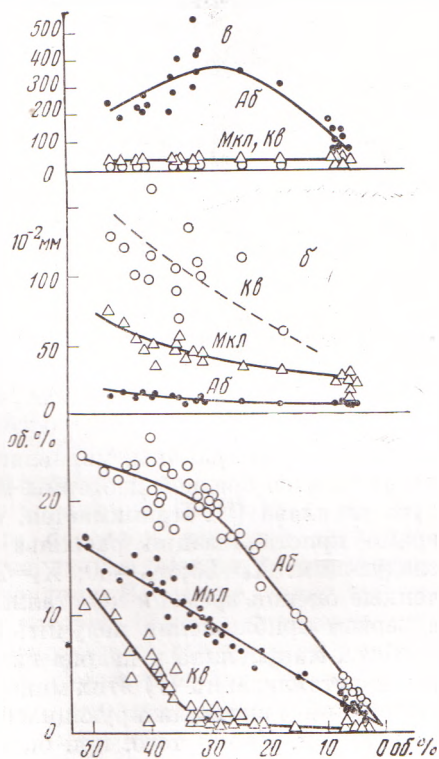


Рис. 1. Зависимость содержания (а), размеров вкрапленников (б) и количества центров кристаллизации — зерен в 1 см^2 (в) от степени закристаллизованности онгонитов

температуры внедрившейся магмы $T_0=600-700^\circ$ ($^\circ$); температуры вмещающих пород $T_c=100-300^\circ$; $\Delta T=50^\circ$; мощности дайки $2R=1-2$ м. Несмотря на широкий диапазон предполагаемых условий кристаллизации онгонитов, Δt сохраняет один и тот же порядок величины. Приведенные данные показывают, что даже в центральных частях дайки онгонитов кристаллизация расплава завершается в течение первых суток после его внедрения. Для анализа линейной скорости кристаллизации вкрапленников упомянутых выше минералов принимаем $a=9 \cdot 10^{-5}$ м²/мин; $T_0=600^\circ$; $T_c=100^\circ$; $\Delta T=50^\circ$; $2R=2,0$ м. При этом распределение Δt вкост простирания дайки соответствует: X_0 (центр) ~ 30 час., X_1 (0,2 м от центра) ~ 20 ; X_2 (0,5 м от центра) ~ 10 ; X_3 (0,8 м от центра) ~ 1 час.

При приближенном решении задачи Стефана для рассматриваемой дайки без учета переохлаждения расплава на фронте его кристаллизации по уравнению $y=\beta\sqrt{\tau}$, где β — корень уравнения:

$$\frac{\lambda}{\sqrt{a}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4a}\right) \left[\frac{T_c - T_0}{2\sqrt{a}} + \frac{T_0 - T_k}{1 - \operatorname{erf} \frac{\beta}{2\sqrt{a}}} \right] = Q\gamma\beta \frac{\sqrt{\pi}}{2},$$

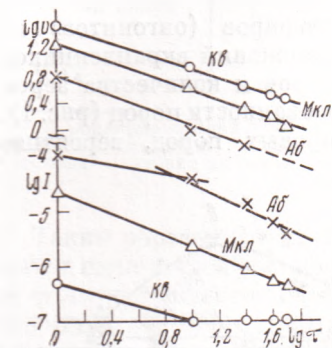


Рис. 2. Зависимость линейной скорости роста (v , 10^{-2} мм/час) и скорости возникновения центров кристаллизации вкрапленников (I , 10^{-2} мм⁻² · час⁻¹) от времени кристаллизации (τ , час.)

где λ — коэффициент теплопроводности вмещающих пород, T_k — температуры кристаллизации, Q — теплота кристаллизации, γ — плотность расплава. Для решения приняты: $\lambda=45$ кал/м · мин · град; $a=9 \cdot 10^{-5}$ м²/мин; $\gamma=2,7$ г/см³; $T_0=600^\circ$; $T_c=100^\circ$; $T_k=550^\circ$. Для этих условий $\beta=6 \cdot 10^{-3}$ м · мин^{-1/2}. Очевидно, что кристаллизация расплава происходит в некоторой метастабильной зоне шириной ΔX , которая и является границей раздела фаз задачи Стефана. Принято считать, что про-

движение этой границы, управляемое уравнением $y=\beta\sqrt{\tau}$, соответствует перемещению средней изотермы между температурами солидуса и ликвидуса расплава (¹). Принимается, что для наших условий $\Delta X=5$ см. Тогда время кристаллизации расплава в разных участках дайки оказывается следующим: $X_0=50$; $X_1=40$; $X_2=25$; $X_3=10$; X_4 (контакт) ≈ 1 час. Полученные оценки времени кристаллизации онгонитового расплава позволили в первом приближении получить линейные скорости кристаллизации (v) альбита, микроклина и кварца из расплава, скорости возникновения центров кристаллизации (I) этих минералов, их соотношения, характер взаимоотношений кристаллизующихся минералов, эволюцию структур пород во времени. Кроме того, при экстраполяции закономерностей кристаллизации до полной закристаллизованности расплава удается оценить минимальные размеры тел интрузивных аналогов онгонитов.

Линейная скорость роста кристаллов рассматриваемых минералов из онгонитового расплава колеблется от десятых до сотых долей миллиметра в час. Эти величины согласуются с имеющимися литературными данными по силикатным системам (²). При возрастании Δt линейная скорость кристаллизации минералов падает (рис. 2), что в известной мере может определяться естественным замедлением теплоотвода от кристаллизующегося расплава. Однако во всем изученном интервале v для кварца больше $v_{\text{мкл}}$ и заметно больше $v_{\text{аб}}$. Если учесть, что соотношения I для альбита, микроклина и кварца прямо противоположные (рис. 2), то естественно появле-

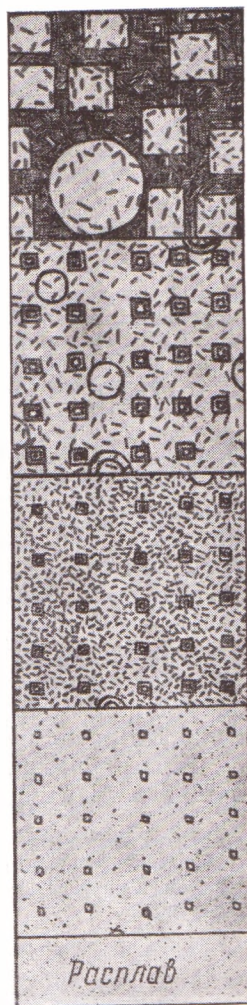
Рис. 3. Эволюция структур при одновременной кристаллизации альбита (черточки и параллелепипеды), микроклина (квадраты) и кварца (кружки) из онгонитового расплава при соотношении v и I , обсуждаемом в тексте. При этом образуются наиболее характерные структуры «апогранитов»: структура «снежного кома», «развитие» альбита в интерстциях и т. п.

ние специфики структур образующихся пород по сравнению со структурами пород, сформированных из минералов с близкими скоростями кристаллизации (рис. 3). Эта специфика выражается в том, что при одновременной кристаллизации всех рассматриваемых минералов порода оказывается сложенной большим количеством относительно мелких кристаллов альбита и сравнительно редкими, но крупными кристаллами микроклина и в особенности кварца. Последние нередко содержат включения зерен альбита или «цементируются» агрегатом альбита, но это не значит, что альбит в породе является более ранним минералом или, наоборот, более поздним, «замещающим» минералом. Очевидно, практически все такие особенности структур «апогранитов»⁽⁸⁾ или альбит-лепидолитовых гранитов⁽⁹⁾ легко объясняются указанными закономерностями кристаллизации онгонитового расплава, в то же время подчеркивая ограниченность принципа «характер идиоморфизма — порядок кристаллизации» минералов при разных скоростях их кристаллизации.

Следует подчеркнуть изломы в логарифмических зависимостях I и τ для кварца и альбита (см. рис. 2). Они приходятся как раз на тот момент кристаллизации расплава, в котором происходило насыщение его фтористым флюидом⁽¹⁰⁾. Появление последнего наряду с расплавом, по-видимому, способствовало изменению параметров кристаллизации. Удобно экстраполировать два участка зависимости рис. 2 до полной

закристаллизованности, выделяя кристаллизацию из ненасыщенного (левый участок) и насыщенного флюидом (правый участок) расплава. Кристаллизация из насыщенного фтористым флюидом расплава приводит в итоге к образованию породы, резко обогащенной весьма крупными кристаллами кварца и в меньшей степени микроклина. Возможно, такая кристаллизация характерна для пегматитов, у которых обычны кварцевое ядро, мегакристаллы некоторых минералов, пегматоидные структуры и т. п. и которые, по современным представлениям, формируются из насыщенного флюидом расплава⁽¹¹⁾. Из ненасыщенного расплава должна формироваться обедненная кварцем, но с вкрапленниками кварца и микроклина, порода. Судя по минеральному составу и размерам зерен альбит-лепидолитовых гранитов, последние кристаллизовались из насыщенного флюидом расплава, но при меньшей активности фтора, чем пегматиты⁽¹⁰⁾. Экстраполяция времени полной кристаллизации расплава позволяет оценить минимальную мощность интрузивного тела (при выбранных теплофизических условиях) альбит-лепидолитовых гранитов (аналогов онгонитов): при 99% закристаллизованности — это 150 м, что не противоречит геологическим фактам^(8, 9).

Важно подчеркнуть наличие прямолинейной зависимости (в виде двух участков на рис. 4) степени закристаллизованности от времени кристал-



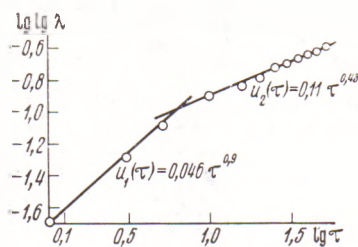


Рис. 4. Зависимость степени закристаллизованности дайки онгонитов от времени кристаллизации в координатах, соответствующих уравнению Аврамы

мент τ в единице объема, ρ_s , ρ_L — плотности твердой и жидкой фаз.

В заключение следует сравнить кристаллизацию онгонитового расплава с наиболее изученными процессами кристаллизации металлов (¹³, ¹⁴) и полимеров (¹², ¹⁵). Для силикатных систем характерны малая величина теплоты кристаллизации и близкие величины теплопроводности расплава и твердой фазы, значительно уступающие по величине теплопроводности металлических систем. В то же время можно заметить близость этих величин с параметрами полимеров. Скорость кристаллизации металлов доходит до десятков сантиметров в час, в то время как для полимеров характерны значения 10^{-1} – 10^{-3} мм/час. Последние величины близки к параметрам силикатных систем.

Таким образом, кристаллизация силикатных систем по многим признакам аналогична кристаллизации полимеров.

Институт геохимии
Сибирского отделения
Академии наук СССР
Иркутск

Поступило
3 XI 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. И. Коваленко, М. И. Кузьмин и др., ДАН, т. 199, № 2, 430 (1971). ² В. Эйтель, Физическая химия силикатов, М., 1962. ³ А. В. Лыков, Теория теплопроводности, М., 1967. ⁴ J. C. Jaeger, Am. J. Sci., v. 255, 306 (1957). ⁵ В. Н. Кобрякова, Физические свойства горных пород, 1962. ⁶ В. Б. Наумов, В. И. Коваленко и др., ДАН, т. 199, № 3, 681 (1971). ⁷ Б. Б. Гуляев, В кн.: Кристаллизация металлов, Изд. АН СССР, 1960. ⁸ А. Л. Беус, В. А. Северов и др., Альбитизированные и грезенизированные граниты (апограниты). Изд. АН СССР, 1962. ⁹ Редкометальные гранитоиды Монголии, «Наука», 1971. ¹⁰ В. И. Коваленко, Геохимия, № 11 (1972). ¹¹ Р. Н. Jahus, C. W. Burnham, Econ. Geol., v. 64, № 8, 843 (1969). ¹² Л. Манделькern, Кристаллизация полимеров, М.—Л., 1966. ¹³ Н. Хворинов, Затвердевание отливок, ИЛ, 1955. ¹⁴ Кристаллизация металлов, Изд. АН СССР, 1960. ¹⁵ А. Шарлаез, Кристаллизация полимеров, М., 1968.