

Ф. А. ЛЕТНИКОВ

К ВОПРОСУ ОБ УСЛОВИЯХ ВЫПЛАВЛЕНИЯ ГРАНИТОИДНЫХ МАГМ

(Представлено академиком Д. С. Коржинским 21 VI 1971)

Общепринято, что подавляющая масса гранитоидов выплавляется в условиях амфиболитовой фации метаморфизма. Подчеркивается теснейшая связь метаморфических и магматических пород: гнейсы — гранодиориты — граниты и пироксеновые гнейсы — чарнокиты. Это обстоятельство и многие другие факты говорят о том, что процесс палингенного выплавления гранитоидных расплавов является изофациальным и во многих случаях изохимическим (¹⁻³).

При изучении гнейсовых толщ фиксируются моменты, когда породы обнаруживают значительную мобильность: следы течения и деструктирования породы. Все предложенные для объяснения этого явления гипотезы за исходный процесс принимают частичное плавление наиболее кислой части породы. Признавая факт частичного плавления гранитоидного субстрата, необходимо обратить внимание на следующее.

1. Процессы «течения» гнейсового субстрата фиксируются в наиболее глубоко метаморфизованных породах амфиболитовой фации, а в условиях гранулитовой фации метаморфизма «течение» пород затухает.

2. «Течение» наблюдается только в кварцсодержащих породах. Бескварцевые и зачастую даже карбонатные породы ведут себя пассивно и бывают растащены мобильным гнейсовым субстратом, ведущим себя как расплав (Шарыжалгай, Прибайкалье).

Тот факт, что при «течении» гнейсов химический и минеральный состав породы, а также размеры зерен практически не изменяются, дает основание утверждать, что в этом случае решающее значение имели какие-то факторы, обусловившие перевод гнейса в вязкопластическое состояние, характерное для расплавов. Если рассматривать плавление как механическую нестабильность, для которой отличие расплава от кристалла заключается в нулевом сопротивлении сдвигу, то для объяснения механизма течения гнейсов при высоких значениях T и P рационально привлечь представление о механическом плавлении пород (⁴). В обычных условиях $T_{\text{мех}}$ — точка механического плавления — определяется как температура преодоления сопротивления сдвигу. Термодинамическая точка плавления $T_{\text{пл}}$ обычно ниже $T_{\text{мех}}$. Но при увеличении давления $T_{\text{пл}}$ может возрастать быстрее, чем $T_{\text{мех}}$, и стать выше ее. В этом случае твердая фаза, даже обладая более низким объемом, чем жидкость, может течь под действием минимальных внешних сдвиговых напряжений при температуре выше $T_{\text{мех}}$ (⁴). Следовательно, если порода находится под давлением $P_{\text{кр}}$, которое препятствует ее термодинамическому плавлению, то будет иметь место механическое плавление и при этом порода будет обладать всеми свойствами квазирасплава, характеризуясь в целом нулевым сопротивлением сдвигу. Так, в гнейсовых толщах возникают псевдорасплавы, в которых при достижении $P_{\text{об}} < P_{\text{кр}}$ совершается обычное термодинамическое плавление, идущее с приращением объема ($+\Delta V$).

Если порода находится в стадии механического плавления, то это состояние является как бы переходным по отношению к термодинамическому плавлению.

Между фазовым переходом и термодинамическим плавлением много общего, тем более что в термодинамике оба эти процесса описываются одинаково, поскольку как в точке фазового перехода, так и в точке плавления свободные энергии обеих фаз становятся равными.

Так как метаморфизм в условиях амфиболитовой фации протекает в интервале $600-750^{\circ}$ (⁵⁻⁷), то при этом обязательно должен иметь место $\alpha - \beta$ -переход кварца. Согласно данным Григгса, Тернера и Херда (⁸), в области $\alpha - \beta$ -перехода имеет место резкое падение, почти до нуля, прочности и вязкости кварца. Более поздние исследования (⁹) с высокой степенью точности зафиксировали значения упругих постоянных кварца в интервале температур от 20 до 650° , включая точку $\alpha - \beta$ -перехода. Было обнаружено, что в интервале $524-580^{\circ}$ упругое поведение кварца является для твердого тела аномальным. В этом интервале все коэффициенты Пуассона отрицательны и весьма велики по своему обычному значению. Это означает, что изменение упругих постоянных кварца, начиная с 524° , приводит к резкому ухудшению устойчивости кристалла по отношению к упругим деформациям и «катастрофически быстрому ухудшению устойчивости относительного расположения подрешеток Si и O» (⁸). Это объясняется тем, что с 524° начинается интенсивное увеличение удельного объема кварца и разрыхление его структуры, при достижении 524° атомы Si уже занимают позиции, отвечающие β -фазе (¹⁰).

Следовательно, в условиях метаморфизма процесс $\alpha - \beta$ -перехода кварца играет огромное значение, поскольку при этом в интервале перехода прочность кварца резко снижается и он по своим свойствам приближается к жидкости, что обуславливает перевод всей массы породы в вязкопластичное состояние и в условиях сжатия — к интенсивному ее перемешиванию, создавая структуры течения. Иными словами, на этой стадии гнейсы без расплавления переходят в пластичное состояние и в определенных условиях могут внедряться в другие породы, разрывать и растаскивать более компетентные в этих условиях пласты амфиболитов и других основных пород, создавая причудливую и трудно поддающуюся структурному анализу всеобщую картину деструктирования породы. Как известно, температура $\alpha - \beta$ -перехода зависит от давления и до 20 кбар имеет линейный характер. Предположив, что интервал резкого изменения прочностных свойств кварца (равный при $\alpha - \beta$ -переходе 51°) с ростом давления остается постоянным, можно наметить зону, соответствующую этому состоянию.

На рис. 1 на основании экспериментальных данных в координатах $P - T$ нанесены 1) зона $\alpha - \beta$ -перехода кварца (¹⁰); 2) кривые солидуса и ликвидуса плавления биотитового гранита из Динки Лейкс (батолит Сьерра Невада) (¹¹); плавление гранита осуществлялось при $P_{H_2O} = P_{об}$; 3) данные (¹²) по плавлению альбита при высоких давлениях в присутствии воды (10 и 14% соответственно) при $P_{об} = P_{H_2O}$ и без воды; 4) границы амфиболитовой и гранулитовой фаций (⁵⁻⁷).

Анализ кривых плавления гранита и альбита относительно положения амфиболитовой фации метаморфизма в координатах $P - T$ не дает объективной информации о течении процесса выщелачивания гранитоидного расплава, поскольку плавление гранита и альбита шло при $P_{об} = P_{H_2O}$, что не соответствует природным условиям, когда $P_{об} \neq P_{H_2O}$. Конфигурация кривых плавления в природных условиях более отвечает таковой для альбита с 10 и 14% H_2O .

В этом плане особое значение приобретает область $\alpha - \beta$ -перехода, в которой кварцсодержащие алюмосиликатные породы будут вести себя как квазирасплавы. При нормальном метаморфизме, протекающем при одновременном росте температуры и давления в координатах $P - T$, система будет двигаться по вектору вдоль зоны $\alpha - \beta$ -перехода (рис. 1), что позволяет утверждать, что от начала и до конца амфиболитовой фации

метаморфизма гнейсы могут находиться в состоянии механического плавления и обладать высокой подвижностью.

Но на прогрессивной стадии метаморфизма в зоне $\alpha - \beta$ -перехода и механического плавления гнейсов не может произойти термодинамического расплавления породы по следующим причинам: 1) $\alpha - \beta$ -переход не может сопровождаться термодинамическим плавлением породы, поскольку он происходит с приращением объема, что равносильно повышению общего давления ($P_{об}$) в системе; 2) повышение давления $P_{об}$ в условиях всестороннего сжатия должно сопровождаться снижением количества

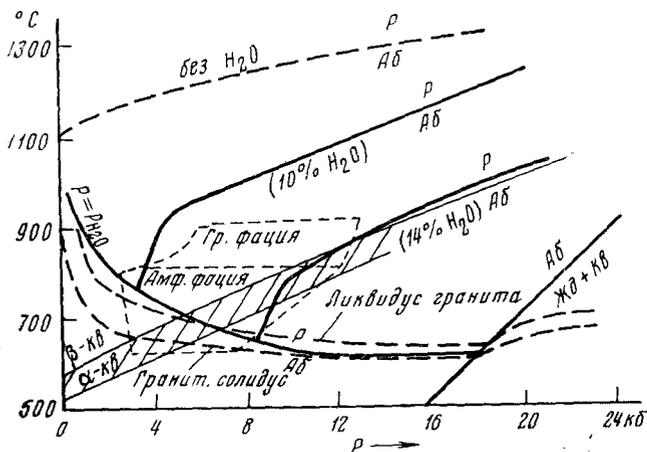


Рис. 1. Кривые плавления гранита ($P = P_{H_2O}$), альбита ($P = P_{H_2O}$ и $P \neq H_2O$ при 10 и 14% H_2O); зона $\alpha - \beta$ -перехода кварца; условные границы амфиболитовой и гранулитовой фации метаморфизма. P — расплав, $Аб$ — альбит, $Жв$ — жадеит, $Кв$ — кварц

воды, что эквивалентно повышению температуры плавления породы; 3) $\alpha - \beta$ -переход протекает с эндоэффектом, величина которого определяется функцией

$$H = \Delta H_{1298}^0 + (H_T^0 - H_{298}^0) + (H_{T,P} - H_{T,P=1}^0),$$

учитывающей изменение энтальпии фазового перехода с одновременным изменением температуры и давления (¹³). Рассчитанные по этому уравнению значения для изобарических сечений вдоль зоны $\alpha - \beta$ -перехода кварца до 15 кбар и 925° во всех случаях фиксируют в интервале перехода в 50° эндотермический эффект от +0,100 до +0,140 ккал/моль, что в сочетании с возрастанием давления $P_{об}$ и снижением количества H_2O еще более уменьшит вероятность термодинамического расплавления породы.

Следовательно, прогрессивный метаморфизм, сопровождаемый $\alpha - \beta$ -переходом кварца, не может привести к выплавлению больших масс расплавов гранитоидного состава. Подтверждением этого тезиса является обширный геологический материал, согласно которому в древних глыбовых и субплатформенных структурах метаморфизм и процессы палингенеза разделены значительным интервалом времени и если метаморфизм знаменует собой прогрессивную стадию, то выплавление больших масс гранитоидов протекает на стадии снятия части давления. Основные причины этого явления связаны с прекращением прогрессивного метаморфизма и общим поднятием данного участка земной коры, характеризующего орогенный этап развития древних консолидированных структур, с которым обычно связан процесс регионального выплавления гранитоидов (¹⁴⁻¹⁶). На этом этапе начинается регрессивный ход процесса, сопровождаемый $\beta - \alpha$ -переходом кварца, который идет уже с экзоэффектом, а уменьшение объема SiO_2 эквивалентно снижению $P_{об}$ и росту количества воды в породе за счет увеличения пористости.

Одновременное сочетание всех этих факторов является весьма благоприятным для термодинамического плавления гнейса, находившегося в состоянии механического плавления.

Институт земной коры
Сибирского отделения Академии наук СССР
Иркутск

Поступило
21 VI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. С. Коржинский, Изв. АН СССР, сер. геол., № 2 (1952). ² Л. Л. Перчук, Равновесия породообразующих минералов, «Наука», 1970. ³ А. А. Маракушев, Проблемы минеральных фаций, «Наука», 1965. ⁴ А. Убеллоде, Плавление и кристаллическая структура, М., 1969. ⁵ Н. А. Добрецов, В. В. Ревердатто и др., Фации метаморфизма, «Наука», 1970. ⁶ Н. Г. Судовиков, Региональный метаморфизм и некоторые вопросы петрологии, Л., 1964. ⁷ Ф. А. Летников, Сборн. Кора и верхняя мантия. Докл. Сов. геол. на XXIII сессии Междунаро. геол. конгр., «Наука», 1968. ⁸ D. T. Griggs, F. Y. Turner, H. C. Heard, Geol. Soc. Am., Mem., 79, 1 (1960). ⁹ В. Г. Зубов, М. М. Фирсова, Кристаллография, 7, 3 (1962). ¹⁰ И. Макейт, О. Г. Туттл, Сборн. статей. Экспериментальные исследования в области петрографии и рудообразования, ИЛ, 1954. ¹¹ A. L. Boettcher, P. J. Wyllie, J. Geol., 76, № 2, 235 (1968). ¹² M. Schimada, Earth and Planet. Sci. Letters, 6, № 6, 447 (1969). ¹³ И. К. Карпов, А. И. Киселев, Ф. А. Летников, Химическая термодинамика в петрологии и геохимии, Иркутск, 1971. ¹⁴ Е. В. Павловский, Тр. Вост.-Сиб. геол. инст., в. 5 (1962). ¹⁵ М. Н. Белянкина, Геология и геофизика, № 8 (1969). ¹⁶ О. М. Розен, В. И. Серых, Сборн. Геология центрального Казахстана, Алма-Ата, 1969.