

М. И. ДУБРОВСКИЙ

**ДИАГРАММА ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ГРАНИТНОЙ СИСТЕМЫ**  
 **$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$**   
**И ЕЕ ПЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ**

(Представлено академиком Д. С. Коржинским 24 I 1971)

Природные граниты в общем случае могут быть удовлетворительно охарактеризованы пятикомпонентной системой  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{Ab}) - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{An}) - \text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{Or}) - \text{SiO}_2(\text{Q}) - \text{H}_2\text{O}$ .

Экспериментальные данные по этой системе ограничены лишь исследованиями Г. фон Платена (<sup>1</sup>), который показал, что эвтектические соотношения компонентов в системе  $\text{Ab} - \text{Or} - \text{Q} - \text{H}_2\text{O}$  значительно изменяются с добавлением анортита и что диаграмма Татла и Боуэна (<sup>2</sup>) отражает частный случай, редко реализующийся в природе. Поэтому, используя имеющиеся экспериментальные данные по частным «гранитным» системам (<sup>2-7</sup>) и применив термодинамические расчеты для «сухих» систем, не изученных экспериментально, автор построил упрощенную диаграмму фазового равновесия вышеуказанной системы (см. рис. 2). Для уяснения принципа ее построения на рис. 1 представлена схематическая диаграмма фазовых взаимоотношений в данной системе при  $P = 1$  атм. Подобная диаграмма при  $P_{\text{H}_2\text{O}} = 2000$  бар рассмотрена Винклером (<sup>8</sup>), — следовательно, нет необходимости детального ее разбора. На рис. 1 добавлено сечение, соответствующее плагноклазу № 20, для лучшего понимания особенностей условно тройной котектики  $M_{\text{Ab}}^3 - E_5^3$  (условно потому, что плагноклаз, как и Na — K-полевоый шпат, принимаются нами за один компонент). Эта котектика представляет собой геометрическое место тройных точек с определенным номером плагноклаза (от альбита до анортита). Ее положение в пространстве в большой степени зависит от положения «начальных» точек:  $M_{\text{Ab}}^3$  — тройной минимум в системе  $\text{Ab} - \text{Or} - \text{Q}$  и  $E_5^3$  — тройная эвтектика в системе  $\text{An} - \text{Or} - \text{Q}$ . Положение этих точек, в свою очередь, зависит от положения двойных эвтектик и  $\text{Ab} - \text{Or}$ -минимума, определенных при различных значениях  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  и  $P_{\text{сух}}$  экспериментально (<sup>2-7</sup>) или термодинамическими расчетами автора. Установленные Татлом и Боуэном (<sup>2</sup>) положения точки  $M_{\text{Ab}}^3$  с изменением  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  нужно признать довольно приближительными, так как при определении соотношений полевых шпатов в «тройном» (фактически двойном: Na — K-полевоый шпат и  $\text{SiO}_2$ ) минимуме применялся грубый способ по 20(<sub>201</sub>). Более правильно определены ими положения кварц-полевошпатовых котектик, которые нами и использовались при построении диаграммы.

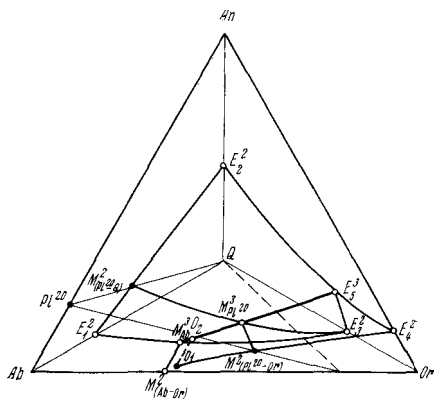
Из-за сложности графического изображения (и чтения) полной диаграммы состояния пятикомпонентной системы предлагается свести ее до четырех-, а для сухой системы — до трехкомпонентной, приняв плагноклаз (твердый раствор An и Ab) за один компонент. Графически это достигается совмещением грани  $\text{An} - \text{Q} - \text{Or}$  тетраэдра  $\text{Ab} - \text{An} - \text{Or} - \text{Q}$  (рис. 1) с гранью  $\text{Ab} - \text{Q} - \text{Or}$ . Затем уже строится упрощенная диаграмма фазового равновесия системы  $\text{Pl} - \text{Or} - \text{Q} - \text{H}_2\text{O}$  (рис. 2) для давлений  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  от 0 до 10 000 бар и  $P_{\text{сух}}$  от 1 до 10 000 бар, т. е. охватывающая условия образования гранитных магм на всю глубину земной коры. Чтобы не загружать диаграмму, проекции двойных и тройных котектик проведены через

определенные интервалы давлений и составов плагиоклаза, а также не показано поле лейцита.

За исходное положение тройной (Pl — Or — Q) котектики принимается ее положение при  $P = 1$  атм. ( $M_{Ab}^3 - E_5^3$ ). Температура плавления в  $M_{Ab}^3$  при  $P = 1$  атм. равна  $960^\circ\text{C}$  <sup>(2)</sup>. Добавление 1% анортита (до 35-го номера плагиоклаза) увеличивает  $T_{пл}$  тройного минимума примерно на  $1^\circ$  <sup>(4)</sup>. При увеличении  $P_{H_2O}$  до 150 бар котектика  $M_{Ab}^3 - E_5^3$  перемещается к кварцевой вершине и в область низких температур ( $\Delta N_{SiO_2} = 10-12$  вес.%,  $\Delta T = -80^\circ$ , рис. 3);  $SiO_2$  в этих условиях представлена тридимитом <sup>(9)</sup>. При  $P_{H_2O} = 150$  бар, в связи с тридимит- $\alpha$ -кварцевым переходом, наступает экстремум в соотношениях компонентов. При повышении  $P_{H_2O}$  до 5000 бар котектика перемещается к полевошпатовой стороне треугольника и в область низких температур, а затем наступает температурный экстремум и с дальнейшим увеличением  $P_{H_2O}$  начинает расти температура <sup>(10, 11)</sup>.

Увеличение  $P_{сух}$  от 1 до 100 бар незначительно перемещает котектику к кварцевой вершине и в область низких температур ( $\Delta N_{SiO_2} = 1\%$ ,  $\Delta T = -10^\circ$ , рис. 3). При  $P_{сух} = 100$  бар наступает экстремум в соотношении компонентов, но кроме того наступает и температурный экстремум. Дальнейшее увеличение  $P_{сух}$  перемещает котектику к полевошпатовой стороне треугольника и в область высоких температур.

Полученная таким образом поверхность является четырехфазовой (+ пар, или флюид  $H_2O$ , при  $P_{H_2O} = P_{ошл}$ ) равновесной котектической по-



верхностью для двух крайних случаев: для сухой системы при  $P_{\text{общ}} = P_{\text{сух}}$  и для системы с полным насыщением водой при  $P_{\text{общ}} = P_{\text{H}_2\text{O}}$ . Промежуточные условия описываются пространством, ограниченным этой поверхностью.

Возможен и второй вариант положения котектической поверхности при  $P_{\text{общ}} = P_{\text{сух}}$ , в котором учитываются данные Грейга, Шеферда и Мервина<sup>(2)</sup> по плавлению природных гранитов.

Применение диаграммы и соответствующих сечений (типа, представленного на рис. 3), которые легко строятся из данных диаграммы, поможет в решении ряда частных петрологических задач.

Кроме того, анализ предлагаемой диаграммы позволяет высказывать некоторые общетеоретические положения «гранитной» петрологии:

1. Граниты в широком диапазоне составов могут быть «гранит-минимумами» или в привычной (но неправильной) терминологии — «эвтектическими» гранитами.

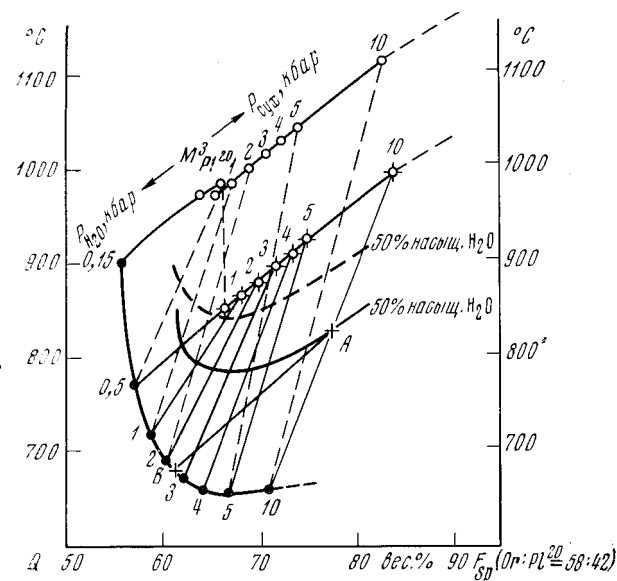


Рис. 3. Котектическое сечение  $Q - M^2_{Pl^{10}}$  к диаграмме рис. 2

2. Максимальное общее давление, при котором в равновесной жидкой фазе присутствует минимальное ( $\approx 20\%$ ) количество «свободной»  $\text{SiO}_2$ , не должно превышать 12—15 кбар, т. е. гранитные расплавы могут появляться только в пределах земной коры.

3. При  $P = \text{const}$  и увеличении температуры будут образовываться расплавы с большим содержанием калия (ортоклаза) и более высоким  $\text{An}/\text{Ab}$ -отношением. Содержание  $\text{SiO}_2$  при этом будет увеличиваться незначительно. Обогащение расплава калием (ортоклазом) будет происходить и при  $\text{An}/\text{Ab} = \text{const}$  (выше плагиоклаза № 10) с увеличением давления.

4. При одном и том же общем давлении расплавы, более насыщенные водой, должны содержать больше  $\text{SiO}_2$ .

5. Гранитные магмы, насыщенные водой, могут генерироваться при  $P_{\text{общ}} = P_{\text{H}_2\text{O}} = 1500\text{—}10\,000$  бар в узком интервале низкой температуры:  $630\text{—}690^\circ$ . Такие условия легко достигаются в амфиболитовой фации метаморфизма.

6. «Сухие» гранитные магмы могут генерироваться при любом давлении, которое достигается в земной коре, но при этом требуется более высокая температура:  $850\text{—}1000^\circ$ .

Очевидно, что в природе реализуются также и промежуточные условия. Поэтому имеет смысл выделять, кроме того, магмы, недосыщенные водой. По механизму генерации различаются гранитные магмы, образованные путем плавления пород, сходных по составу с гранитами (анатектические), и гранитные магмы — дифференциаты более основной магмы. Механизм генерации и степень насыщенности магмы водой обуславливаются главным образом глубиной (давлением), или фациями (зонами) глубинности генерации гранитных магм. Вполне обоснованно можно выде-

лить: гинабиссальную (малоглубинную), мезоабиссальную (среднеглубинную) и абиссальную (глубинную) фации. Границы между ними определяются геотермическим градиентом, который в орогенических областях достигает 50—100 град/км, и минимальными температурами плавления «мокрой» ( $\approx 640^\circ$ ) и «сухой» ( $\approx 850^\circ$ ) магм. Отсюда нижняя граница гинабиссальной зоны (верхняя мезоабиссальной) может колебаться от 6,5 до 12,5 км, а верхняя граница абиссальной (нижняя мезоабиссальной) от 9 до 17 км.

В связи с выделением фаций глубинности генерации магм уточняются условия образования того или иного типа магм. «Сухие» и недосыщенные водой магмы образуются плавлением гранитоидных пород в абиссальной фации и могут интродуцировать до любых горизонтов земной коры в зависимости от «энергосодержания» магмы и тектонической обстановки, т. е. фации глубинности становления пород за счет таких магм могут изменяться от абиссальных до поверхностных. Насыщенные водой магмы образуются также плавлением гранитоидных пород, но в мезоабиссальных условиях и, по всей вероятности, не могут интродуцировать в верхние зоны, так как они имеют низкую температуру и потеря летучих в процессе интрузии немедленно приведет к кристаллизации магмы.

В гинабиссальной фации гранитные магмы образуются только путем дифференциации более основной, потому что здесь температура не достигает значений, достаточных для плавления гранитоидных пород. По насыщенности водой такие магмы могут быть различными — от «сухих» до насыщенных, — а условия становления комплексов пород за счет них могут изменяться от гинабиссальных до поверхностных.

Геологический институт  
Кельского филиала им. С. М. Кирова  
Академии наук СССР  
Апатиты

Поступило  
30 X 1970

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Г. фон Платен, В сборн. Природа метаморфизма, 1967. <sup>2</sup> O. F. Tuttle, N. L. Bowen, Geol. Soc. Am. Mem., 74 (1958). <sup>3</sup> H. R. Shaw, Am. Mineral., 48, 883 (1963). <sup>4</sup> D. W. Stewart, Schweiz. mineral. und petrogr. Mitt., 47, H. 1 (1967). <sup>5</sup> J. B. Lambert, I. K. Robertson, P. I. Wyllie, Am. J. Sci., 267, № 5, 609 (1969). <sup>6</sup> W. C. Luth, Am. J. Sci., 267-A Schairer vol., 325 (1969). <sup>7</sup> X. C. Йодер, Д. Б. Стюарт, Д. Р. Смит, В сборн. Вopr. теоретической и экспериментальной петрологии. ИЛ, 1963. <sup>8</sup> Г. Винклер, Генезис метаморфических пород, М., 1969. <sup>9</sup> G. C. Kennedy, G. J. Wasserburg et al., Am. Sci., 260, № 7, 501 (1962). <sup>10</sup> А. А. Кадик, Н. И. Хитаров, Геохимия, № 10, 886 (1963). <sup>11</sup> Е. Б. Лебедев, Н. И. Хитаров, Геохимия, № 3, 195 (1964).