

УДК 551.2.01+551.251

ФАЗОВЫЕ ОТНОШЕНИЯ В БАЗИТОВОЙ СИСТЕМЕ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЕ С/Н В МЕТАМОРФИЧЕСКОМ ФЛЮИДЕ

© 2002 г. Б. С. Данилов

Представлено академиком Ф.А. Летниковым 06.12.2001 г.

Поступило 21.12.2001 г.

Метабазиты – продукты метаморфизма магматических пород основного состава – являются типичными широко распространенными составляющими метаморфических комплексов. Известно, что эти породы весьма чувствительны к изменению *PT*-условий и флюидного режима метаморфизма, вследствие чего представляют собой хорошие индикаторы обстановки породообразования. Не случайно именно характерные минеральные ассоциации метабазитов были использованы П. Эскола при разработке им первой схемы метаморфических фаций. Однако, несмотря на длительную историю изучения, фазовые отношения в метабазитовой системе остаются до сих пор недостаточно понятны, особенно в отношении влияния состава взаимодействующего с породой флюида (флюидного режима метаморфизма).

Нами методом минимизации свободной энергии Гиббса по программе “Селектор-С” [1] были рассчитаны равновесные минеральные ассоциации в модельной $K-Na-Ca-Mg-Fe-Al-Si-O-H-C$ системе, пригодной для изучения фазовых отношений в основных породах при метаморфизме. За исходную породу при моделировании принят средний состав базальта по Кармайклу [2], к которому в количестве, определяющемся из соотношения 1 (флюид) к 10 (порода), добавлялся гипотетический флюид, своим составом задающий величину *S/N*. Предполагалось, что этот флюид находился в максимально окисленном состоянии (т.е. представлял собой смесь воды и углекислоты). Составы взаимодействующего с исходной породой флюида, таким образом, в треугольнике $S-O-H$ (рис. 1) расположены на прямой, соединяющей фигуративные точки H_2O и CO_2 . Расчеты выполнены в интервале температур 300–1000°C и давлений 2–8 кбар. При моделировании предполагалось, что $P_{фл} = P_{об}$.

По результатам расчетов построены диаграммы, представляющие *PT*-сечения для трех вари-

антов состава системы, характеризующихся различным *S/N*-отношением (с различной долей углерода в системе). Эти диаграммы показаны на рис. 2 в виде блок-схемы. Диаграмма с нулевым *S/N* (рис. 2а), что соответствует “чисто” водному флюиду, использовалась для проверки (в сравнении с имеющимися петрологическими и экспериментальными данными [3–5]) адекватности построенной модели и корректности (согласованности) используемой термодинамики.

На этой диаграмме присутствуют пять качественных смен минеральных ассоциаций: 1) пренит-пумпеллитовые (субзеленосланцевая фация); 2) бесплагноклазовые ассоциации с лавсонитом (фация голубых сланцев); 3) зеленосланцевые; 4) амфиболитовые; 5) гранулитовые. Ассоциация с пренитом (Pre) устойчива при очень низких температурах (<310°C) и давлении менее 4 кбар. Выше этого давления Pre в парагенезисах замещается пумпеллитом (Pump). Равновесие, в котором бы присутствовали и тот, и другой минерал, находится за пределами выбранного температурного окна приблизительно в районе 250°C [3]. Повышение давления сопровождается постепенным уменьшением количества плагиоклаза, который выше 7 кбар исчезает полностью, при этом в ассоциациях появляется лавсонит (Lws). Одновременно происходят характерные изменения в составе моноклинового амфибола (повышается содержание натриевых минералов – глаукофана и рибекита). Схематично этот процесс можно представить в виде следующей реакции: $Tr + Ab + Chl = Lws + Gl$. В итоге образуется ассоциация ($Q-cAm-Mu-Chl-Lww-Pump$), характерная для метабазитов, сформировавшихся в условиях низкотемпературной части фации голубых сланцев. С ростом температуры количество Pre и Pump резко уменьшается, что является следствием протекания серии реакций, продукты которых представляют собой компоненты моноклинового амфибола и эпидота ($Pre/Pump + Chl + Q = Tr + Ep + H_2O$). В результате формируется типичная зеленосланцевая ассоциация, состоящая из кварца (Q), плагиоклаза (Pl), моноклинового амфибола

(cAm), мусковита (Mu), эпидота (Ep) и хлорита (Chl). Дальнейший рост температуры сопровождается увеличением модаляного количества cAm и Pl при уменьшении доли Chl и Ep в парагенезисах. Переход к амфиболитовой фации отмечается [3, 5] по смене тремолит-актинолитового амфибола чермакит-паргаситовой роговой обманкой одновременно с появлением более основного плагиоклаза. В модельных расчетах этот переход реализуется в интервале 450–500°C. От 500 и до 700°C на диаграмме наблюдается большое разнообразие парагенезисов, представляющих собой различные комбинации минералов из набора: Q, Pl, cAm, ромбический амфибол (oAm), Mu, биотит (Bi), Chl, Ep, магнетит (Mt), клинопироксен (cPy) и гранат (Gr). Основу этих парагенезисов составляют Pl и cAm; таким образом, все эти ассоциации относятся к амфиболитовой фации. Вариации минерального состава внутри этого интервала заключаются в уменьшении (до полного исчезновения) количеств Chl, Ep и Q, замещении мусковита биотитом и появлении oAm, Mt, cPy и Gr. Образование ромбического амфибола наблюдается после 450°C, и с повышением давления эта температура поднимается до 515°C. Максимальная температура устойчивости хлорита 530°C. Эпидот присутствует в парагенезисах при низком давлении до 450°C, а при повышении давления область его устойчивости расширяется до 650°C. Замещение мусковита биотитом происходит, в зависимости от давления, от 370 до 600°C. Гранатосодержащие парагенезисы существуют при давлении более 7.5 кбар в температурном интервале 580–700°C. С появлением моноклинного пироксена (550–650°C) начинает плавно снижаться содержание моноклинного амфибола и увеличиваться количество плагиоклаза. После 700°C, когда в парагенезисах появляется ортопироксен и исчезает ромбический амфибол, образуются ассоциации, состоящая из Pl, cAm, cPy, oPy, Bi и Mt. Эту границу в рамках модели можно считать индикатором достижения гранулитовых условий. Дальнейший рост температуры сопровождается постепенным увеличением количества Pl, cPy и oPy при уменьшении содержания cAm. При $P < 5$ кбар и $T > 900^\circ\text{C}$ амфибол исчезает полностью.

Вторая диаграмма (рис. 2б) построена для состава, в котором количество водорода превышает углерод в 5 раз ($C/H = 0.2$). Поля фазовых равновесий на этой диаграмме в значительной степени наследуют свое положение от полей, наблюдаемых на первой диаграмме, смещаясь в целом вниз по температуре примерно на 25–50°C. Добавление углерода к системе приводит к появлению новой фазы – карбоната (Carb). Кроме того, отмечается уменьшение содержания гидратных фаз в парагенезисах, что вполне очевидно, принимая во внимание снижение активности воды. На диаграмме отсутствует парагенезис с Pre, а поле ста-

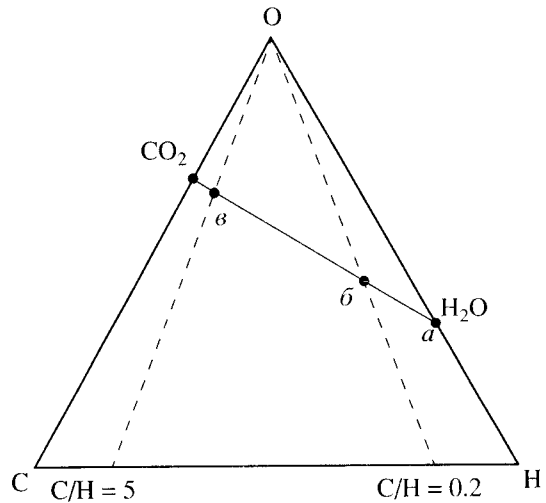


Рис. 1. Составы флюида, используемые в расчетах.

бильности Lws заметно расширено в область низких давлений. Существенным отличием является также увеличение области устойчивости парагенезисов с гранатом, которые на этой диаграмме занимают интервал от 550–700°C и более разнообразны по набору фаз в равновесии.

На третьей диаграмме (рис. 2в) представлены парагенезисы, рассчитанные для состава с $C/H = 5$. При таком отношении C к H содержание CO_2 превосходит H_2O в 10 раз. В результате этого диаграмма значительно отличается от двух других. Первое, что обращает на себя внимание: в низкотемпературных парагенезисах отсутствует хлорит, а эпидот устойчив только при $P > 6$ кбар и исчезает уже после 450°C. Гранатосодержащие парагенезисы существуют в интервале 300–700°C при $P > 6.5$ кбар. По набору минералов (Q–Pl–Ksp–Bi–cAm–Gr–Carb–Mt) такие породы представляют собой кристаллосланцы и более характерны для условий амфиболитовой фации. Двупироксеновые ассоциации, являющиеся диагностическими для гранулитовых пород, здесь образуются уже с 500°C. Рост C/H-отношения вызвал также увеличение количества карбоната и расширение области его устойчивости до 600–800°C. Калий, на первых двух диаграммах входивший в слюды (Bi и Mu), для этого варианта состава по большей части фиксируется в полевого шпате. При $T > 900^\circ\text{C}$ и $P > 5$ кбар образуются парагенезисы со шпинелью. Отсутствие графита среди прочих минералов позволяет заключить, что C/H-отношение не является решающим условием для его образования и более важна степень восстановленности метаморфизирующего флюида.

Таким образом, выполненные расчеты показывают, что изменение отношения C/H во флюиде способно существенным образом повлиять как

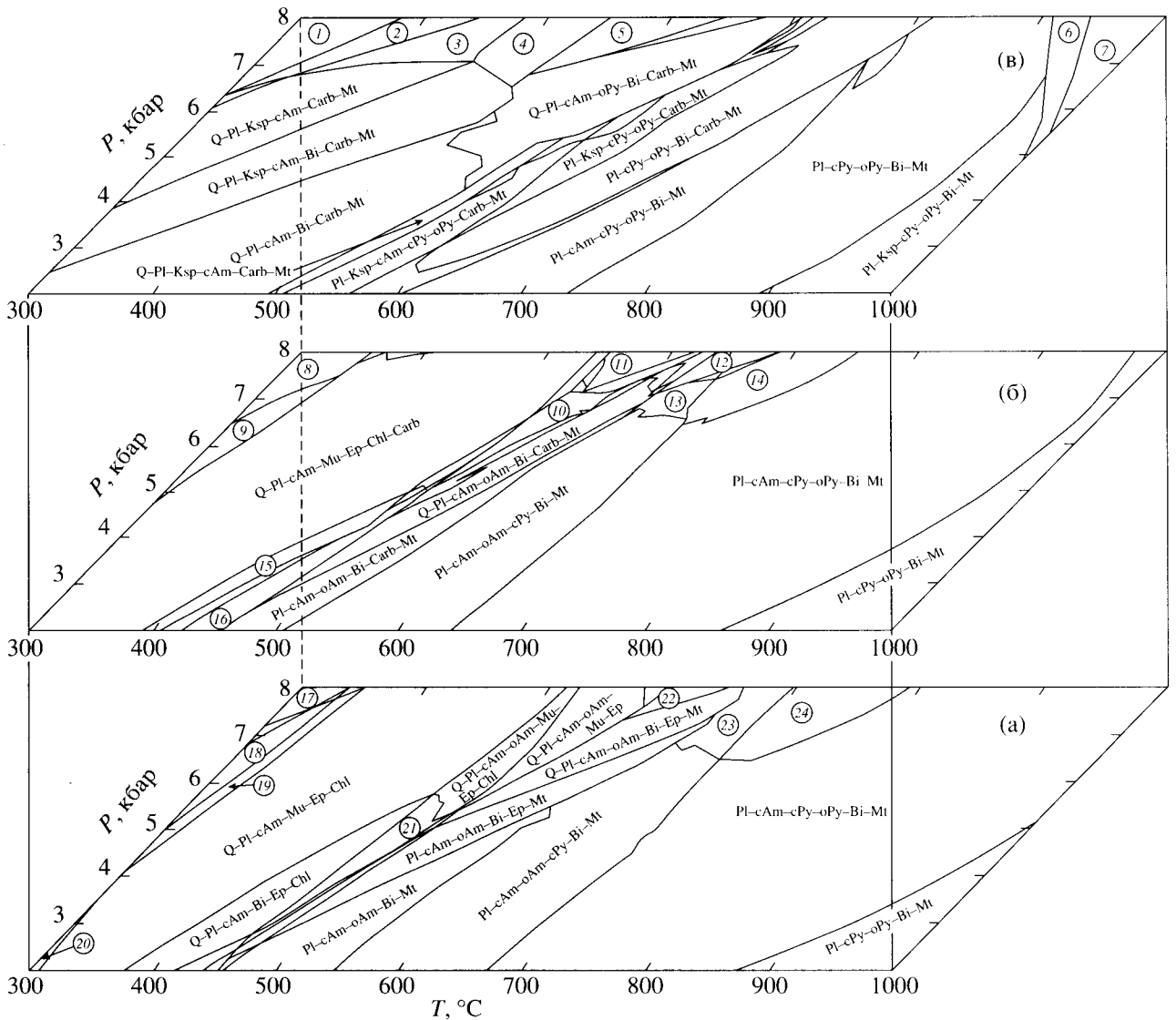


Рис. 2. Блок-схема с рассчитанными PT -диаграммами. Снизу вверх увеличивается доля CO_2 во флюиде (а – H_2O -флюид; б, в – смесь H_2O-CO_2 : б – $C/H = 0.2$, в – $C/H = 5$). Цифрами показаны поля с парагенезисами: 1 – Q-Pl-Ksp-cAm-Gr-Ep-Carb-Ky-Mt; 2 – Q-Pl-Ksp-cAm-Gr-Ep-Carb-Mt; 3 – Q-Pl-Ksp-cAm-Gr-Carb-Mt; 4 – Q-Pl-Ksp-cAm-Bi-Gr-Carb-Mt; 5 – Q-Pl-cAm-Bi-Gr-Carb-Mt; 6 – Pl-Ksp-cPy-oPy-Bi-Mt-Sp; 7 – Pl-Ksp-cPy-oPy-Mt-Sp; 8 – Q-cAm-Mu-Chl-Carb-Pump-Lws; 9 – Q-Pl-cAm-Mu-Ep-Chl-Carb-Lws; 10 – Q-Pl-cAm-oAm-Mu-Ep-Carb-Mt; 11 – Q-Pl-cAm-Mu-Gr-Ep-Carb; 12 – Q-Pl-cAm-cPy-Bi-Gr-Carb-Mt; 13 – Q-Pl-cAm-oAm-cPy-Bi-Mt; 14 – Q-Pl-cAm-cPy-oPy-Bi-Mt; 15 – Q-Pl-cAm-Bi-Ep-Chl-Carb; 16 – Q-Pl-cAm-Bi-Chl-Carb-Mt; 17 – Q-cAm-Mu-Chl-Pump-Lws; 18 – Q-Pl-cAm-Mu-Chl-Pump; 19 – Q-Pl-cAm-Mu-Ep-Chl-Pump; 20 – Q-Pl-cAm-Mu-Ep-Chl-Pre; 21 – Q-Pl-cAm-oAm-Bi-Ep-Chl; 22 – Q-Pl-cAm-oAm-Bi-Gr-Ep; 23 – Q-Pl-cAm-oAm-cPy-Bi-Mt; 24 – O-Pl-cAm-cPy-oPy-Bi-Mt. Аббревиатуры минералов расшифрованы в тексте.

на составы минералов в парагенезисах, так и на конфигурацию полей фазовых равновесий и на их положение в PT -пространстве.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 99-05-64189).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karpov I.K., Chudnenko K.V., Kulik D.A. // Amer. J. Sci. 1997. V. 297. № 8. P. 767–806.
2. Carmichael R.S. Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals. Boca Raton: CRC Press, 1989.
3. Bucher K., Frey M. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. В.: Springer, 1994. P. 318.
4. Физико-химический анализ процессов минералообразования / Под ред. В.А. Жарикова М.: Наука, 1989. 246 с.
5. Плюснина Л.П. Экспериментальное исследование метаморфизма базитов. М.: Наука, 1983. 158 с.