

УДК 552.16

ГИПЕРСТЕН В АССОЦИАЦИИ С СИЛЛИМАНИТОМ И КВАРЦЕМ КАК ИНДИКАТОР УСЛОВИЙ МЕТАМОРФИЗМА

© 2003 г. К. К. Подлесский

Представлено академиком А. А. Маракушевым 03.09.2002 г.

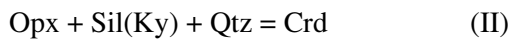
Поступило 10.09.2002 г.

Ассоциация гиперстена с силлиманитом издавна рассматривается петрологами как признак глубинного формирования содержащих ее гранулитов и даже дала название соответствующей метаморфической фации [5], а повышенное содержание Al_2O_3 в ортопироксене (>7–8 мас. %) считается индикатором так называемого сверхвысокотемпературного метаморфизма (900–1100°C [10]). Согласование термодинамических свойств минералов постоянного состава и конечных членов твердых растворов со свойствами смешения в системе $FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ (FMAS), проведенное в работах [8, 9, 11, 15], дает возможность уточнить положение границ устойчивости этого парагенезиса и характер влияния температуры на глиноземистость гиперстена.

Если не учитывать реакций с участием сапфирина, которые будут рассмотрены чуть позже, в краевой системе $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ (MAS) область устойчивости ассоциации $Orx + Sil + Qtz$ ограничивается реакциями*



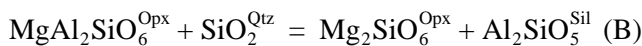
верхний предел по давлению и



нижний предел (рис. 1). В широкой полосе PT -условий между этими реакциями глиноземистость ортопироксена регулируется реакцией



если пользоваться моделями твердого раствора ортопироксена [8, 9], или реакцией

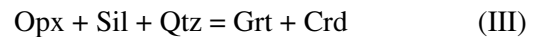


* Обозначим минералов и компонентов твердых растворов, как в работах [6, 9, 13, 14]. Параметры состава Orx : магнетизальность $N_{Mg} = 100Mg/(Mg + Fe)$; глиноземистость, $N_{OK} = 100Al/(Al + 2Mg + 2Fe)$.

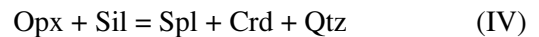
Институт экспериментальной минералогии
Российской Академии наук,
Черноголовка Московской обл.

для модели [11, 15]. Соответствующие изоплеты N_{OK} на PT -диаграмме имеют весьма крутой наклон, что свидетельствует о зависимости глиноземистости гиперстена в парагенезисе с силлиманитом и кварцем главным образом от температуры. Хорошее разрешение изоплет демонстрирует возможность использования реакции (A) или (B) в качестве геотермометра.

В системе FMAS нижняя по давлению граница устойчивости ассоциации $Orx + Sil + Qtz$ определяется реакцией



при относительно низкой температуре и реакцией



в высокотемпературной области. В относительно низкотемпературных условиях в отсутствие кварца устойчивость $Orx + Sil$ определяется реакцией

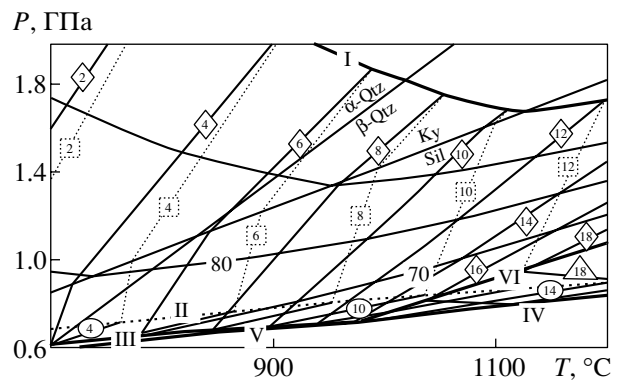
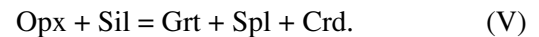


Рис. 1. Фазовые отношения гиперстен-силлиманитовых ассоциаций в системе FMAS, рассчитанные по [9] без учета реакций с сапфирином. Здесь и далее реакции пронумерованы, как в тексте, и обозначены жирными линиями. Изоплеты для $Grt + Orx + Sil + Qtz$ – сплошные тонкие линии, значения N_{OK} заключены в ромб, N_{Mg} – необведенные; $Crd + Orx + Sil + Qtz - N_{OK}$ в овале; $Spl + Orx + Sil + Qtz - N_{OK}$ в треугольнике. Тонкие точечные линии – изоплеты N_{OK} (в квадрате) для $Orx + Sil + Qtz$ в MAS.

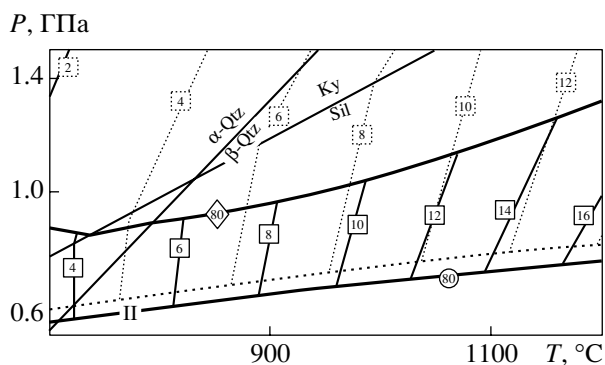


Рис. 2. Границы устойчивости $\text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$, рассчитанные при $N_{\text{Mg}} = 80$ по [9]. Верхний по давлению предел – изоплета для $\text{Grt} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ (значение N_{Mg} заключено в ромб), нижний – $\text{Crd} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ (N_{Mg} в овале). Линии постоянной глиноземистости гиперстена сплошные, в квадрате – $N_{\text{ОК}}$. Точечные линии – как на рис. 1.

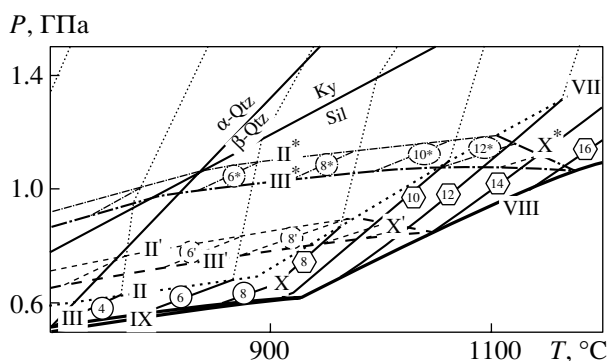


Рис. 3. Фазовые отношения гиперстен-силлиманитовых ассоциаций в системе FMAS, рассчитанные по [9] с учетом реакций с Fe-содержащим сапфирином (по [14]) и влияния флюида на стабилизацию кордиерита. Линии постоянной глиноземистости гиперстена: для $\text{Crd} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ значения $N_{\text{ОК}}$ в овале; $\text{Spr} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ – в шестиугольнике. Звездочка – расчет с водонасыщенным кордиеритом (штрихпунктир), с верним штрихом – $\text{Crd} \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (пунктир).

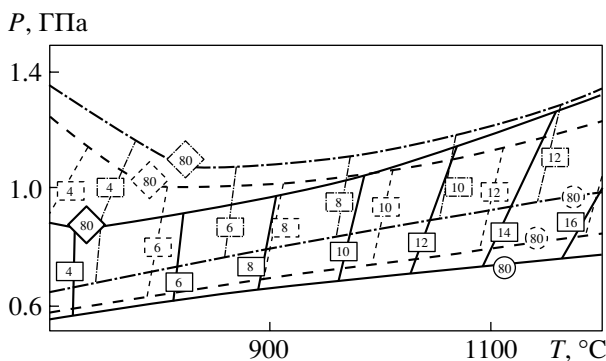
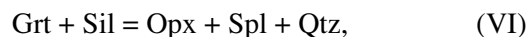


Рис. 4. Сравнение границ устойчивости $\text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$, рассчитанных при $N_{\text{Mg}} = 80$ по [9] – сплошные линии, по [8] – штрих-пунктир, по [11, 15] – пунктир. Обозначения изоплет – как на рис. 2.

В отличие от системы MAS, где состав ортопироксена в ассоциации $\text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ фиксирован при фиксированных PT -условиях, что позволяет отразить его изменение с помощью изоплет на двухмерной PT -диаграмме, для системы FMAS такое возможно лишь для ассоциаций $\text{Grt} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$, $\text{Crd} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ и $\text{Spl} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ (рис. 1). Поле устойчивости $\text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$, таким образом, делится реакцией (II), ограничивающей стабильность кордиерита, и реакцией

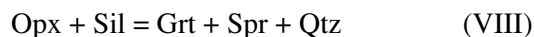


которая разграничивает гранат- и шпинель-содержащие ассоциации. Очевидно, что в таких ассоциациях четырех минералов изменение глиноземистости ортопироксена сопряжено с изменением его магнезиальности и составов других Fe–Mg-фаз, и зависимость этого изменения с температурой и давлением имеет более сложный характер. В частности, важно обратить внимание на сужение поля устойчивости $\text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ и смещение в низкотемпературную область изоплет $N_{\text{ОК}}$ при снижении магнезиальности (рис. 2). При анализе условий образования гранулитов следует учитывать, что относительно более железистый гиперстен в парагенезисе с силлиманитом и кварцем неустойчив ниже определенных глубин и его высокая глиноземистость не обязательно говорит о сверхвысокой температуре метаморфизма – по крайней мере, не такой высокой, как требует стабильность чисто магнезиального ортопироксена.

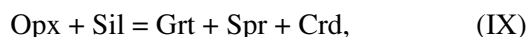
Картина еще меняется, если ввести в круг рассматриваемых минералов сапфирина и учесть влияние флюида на стабилизацию кордиерита (рис. 3). В системе MAS реакция



определяет нижний по давлению предел устойчивости ортопироксена с силлиманитом при относительно высокой температуре (в низкотемпературной области – это реакция (II)). В системе FMAS, если пользоваться предварительными (недостаточно обоснованными экспериментально) данными по термодинамике Fe-содержащего сапфирина [14], шпинельсодержащие реакции (IV) и (V) нестабильны и сменяются реакциями



и



которые, сужая поле стабильности $\text{Opx} + \text{Sil}$, обуславливают появление соответствующих полей сапфирина-содержащих ассоциаций – в частности, $\text{Spr} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ в области относительно высоких температур. Поле этой ассоциации отделяется от поля $\text{Crd} + \text{Opx} + \text{Sil} + \text{Qtz}$ реакцией

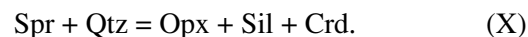


Таблица 1. Оценка температуры по составу гиперстена в ассоциации с силлиманитом и кварцем из гранулитов некоторых метаморфических комплексов России

№ п.п.	№ обр.	Другие минералы в образце	N_{Mg}	N_{OK}	T_1	T_2	T_3
Алданский щит, Сутамский комплекс							
1	Е-1252-6	Grt-Crd-Bt-Kfs-Rt	63.3 ^{a)}	7.4 ^{a)}	815 ± 9	915 ± 6	795 ± 12
2	»		63.5 ^{b)}	5.2	737 ± 3	810 ± 4	685 ± 9
3	»		63.7 ^{b)}	6.3	777 ± 4	865 ± 5	743 ± 10
4	»		65.1 ^{r)}	9.3	882 ± 16	1001 ± 8	895 ± 13
5	Е-1571/11	Crd-Bt-Kfs-Rt	68.0	8.2	858 ± 12	955 ± 8	855 ± 12
6	Е-1571-23	Grт-Bt-Pl-Rt	66.3	8.1	849 ± 12	949 ± 7	842 ± 12
7	Е-395	Grт-Crd-Bt-Pl-Kfs	73.6	9.9	935 ± 18	1034 ± 11	960 ± 13
8	Сут-28	Grт-Crd-Bt-Pl-Kfs	68.7	8.3	863 ± 13	959 ± 8	861 ± 12
9	»		70.4	7.7	851 ± 11	936 ± 8	843 ± 12
10	Сут-61	Grт-Bt-Pl-Kfs-Rt	73.8	8.2	881 ± 13	962 ± 9	882 ± 12
11	»		77.4	8.1	891 ± 13	962 ± 10	894 ± 12
12	»		77.6	7.8	880 ± 12	946 ± 9	878 ± 12
13	»		78.9	8.3	901 ± 14	969 ± 10	907 ± 13
	В-114/3	Grт-Bt-Pl-Kfs	73.7	9.9	937 ± 18	1037 ± 11	963 ± 13
15	»		74.5	9.1	912 ± 15	1000 ± 10	926 ± 13
Анабарский щит, р. Б. Куонамка							
16	И-568/3а	Crd-Bt-Kfs	74.5	9.4	924 ± 16	1016 ± 10	943 ± 13
Балтийский щит, Центральнo-кольский комплекс							
17	231/11	Spr-Spl-Crd-Bt-Kfs	72.3	5.2	762 ± 5	813 ± 6	721 ± 9
18	231/5	Spr-Spl-Crd-Bt-Kfs	73.3	8.0	871 ± 12	951 ± 9	869 ± 12
19	»		72.2	8.4	883 ± 13	970 ± 9	886 ± 13
Становая складчатая область, Чогарский комплекс							
20	Чог-6	Grт-Crd-Bt-Pl-Kfs	71.9	5.8	787 ± 7	846 ± 6	754 ± 10
21	»		74.5	6.1	806 ± 8	862 ± 7	780 ± 11
22	Чог-6б	Grт-Crd-Bt-Pl-Kfs	75.4	8.9	910 ± 15	994 ± 10	922 ± 13
23	»		76.1	9.5	935 ± 17	1023 ± 11	956 ± 13
24	Г-621-Е	Grт-Crd-Pl-Kfs-Rt	75.2 ^{л)}	10.9	974 ± 21	1079 ± 12	1014 ± 14
25	»		76.4 ^{е)}	10.0	950 ± 18	1042 ± 11	978 ± 13
26	»		79.9 ^{ж)}	7.8	885 ± 13	946 ± 10	886 ± 12
27	Ток-18	Grт-Crd-Bt-Pl-Kfs	71.8 ^{з)}	11.3	972 ± 22	1092 ± 12	1018 ± 14
28	»		72.0 ^{и)}	8.7	891 ± 14	982 ± 9	898 ± 13*

Примечание. 1–7 – по данным [4], 8–13, 20–23 – по [12], 14–16 – по [3], 17–19 – по [1], 24–26 – по [2], 27–28 – по [6], N_{Mg} и N_{OK} пересчитаны из микронзондовых анализов, приведенных авторами. T_1 – расчет при 0.75 ГПа по реакции (А) с использованием данных [9], T_2 – то же с данными [8], T_3 – по реакции (В) с данными [11, 15], разброс значений соответствует изменению давления ±0.25 ГПа. ^{a)} из Орх–Crd-каймы вокруг Grt у контакта с Grt, ^{b)} из внешней части Орх–Crd-каймы вокруг Grt, ^{в)} из середины Орх–Crd-каймы вокруг Grt, ^{г)} из сростков с Sil, ^{д)} центр крупного зерна, ^{е)} край крупного зерна, ^{ж)} край зерна в контакте с Sil, ^{з)} средний из 5 анализов центральных частей крупных зерен, ^{и)} средний из 8 анализов в краях у контакта с Sil и Qtz.

Учитывая близость положения линий реакций (V) и (IX) на PT -диаграмме, необходимо соблюдать осторожность при экстраполяции результатов подобного расчета на наблюдаемые в природе соотношения минералов. Достаточно небольшого из-

менения активности компонентов твердых растворов Spl или Spr (например, как в [13] за счет несколько отличной термодинамики Spr), чтобы топология диаграммы изменилась и появилась область устойчивости Орх + Sil + Qtz и с сапфири-

ном, и с шпинелью. Значительное влияние могут оказать примеси таких компонентов, как Zn и Sr, а также степень окисления Fe [10].

Важная особенность смены гиперстен-силлиманитовых ассоциаций альтернативными кордиеритсодержащими состоит в том, что она связана не только с изменением *PT*-условий, но и сильно подвержена влиянию флюида. Это, с одной стороны, усложняет парагенетический анализ соответствующих гранулитов, но, с другой, позволяет делать выводы относительно флюидного режима метаморфизма, а не только оценивать температуру и давление – здесь помогает рассмотрение различных реакций, которые могут протекать одновременно [6]. Стоит отметить, что в “сухих” условиях – в отсутствие флюида или при весьма низкой активности летучих – область устойчивости ортопироксена с силикатом глинозема весьма широка, не ограничивается только высоким давлением и температурой и позволяет рассматривать как стабильный даже экзотический парагенезис $Orx + And$, обнаруженный в метаморфических породах Центральной Австралии [7]. Лишь в условиях достаточно высокой активности воды, когда резко расширяется поле стабильности кордиерита**, гиперстен-силлиманитовые ассоциации смещаются в область повышенного давления и более магнезимального состава ортопироксена.

Вряд ли требует пояснений, что оценка температуры метаморфизма гранулитов по глиноземистости гиперстена в парагенезисе с силлиманитом и кварцем на основе реакции (А) (или (В)) в небольшой степени связана с параметрами термодинамической модели твердого раствора ортопироксена. Влияние их выбора иллюстрируют рис. 4 и табл. 1: для одного и того же состава Orx значения температуры, рассчитанные по моделям [8, 9] и [11, 15], могут отличаться на 100°C и более. Тем не менее очевидно преимущество этого геотермометра перед индикаторами условий метаморфизма, которые основаны на распределении компонентов между ортопироксеном и другими фаза-

ми переменного состава: в реакции (А) (или (В)) участвует только один твердый раствор, и, следовательно, исключаются ошибки, связанные с описанием изменения состава других минералов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант 00–05–64881). Использованы также данные, полученные при поддержке фонда им. А. фон Гумбольдта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авакян К. Х.*, Геология и петрология Центрально-Кольской гранулитогнейсовой области архея, М., Наука, 1992. и 168 с.
2. *Авченко О.В.* Минеральные равновесия в метаморфических породах и проблемы геобаротермометрии. М.: Наука, 1990. 181 с.
3. *Кицул В.И., Берёзкин В.И., Дамаскина Г.Д., Шкадинский В.В.* Таблицы химических составов и кристаллохимических формул минералов из метаморфических пород и гранитоидов Алданского щита, Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983. 360 с.
4. *Кориковский С.П., Кислякова Н.Г.* В кн.: Метасоматизм и оруденение, М.: Наука, 1975. С. 314–341.
5. *Маракушев А.А., Кудрявцев В.А.* // ДАН. 1965. Т. 164. № 1. С. 179–182.
6. *Aranovich L.Ya., Podlesski K.K.* / In: Evolution of Metamorphic Belts, Oxford: Blackwell Sci. Publ. 1989. P. 45–62.
7. *Ballevre M., Hensen B.J., Reynard B.* // Geology. 1997. V. 25. № 3. P. 215–218.
8. *Berman R.G., Aranovich L.Ya.* // Contrib. Mineral. and Petrol. 1996. V. 126. № 1/2. P. 1–24.
9. *Gerya T.V., Perchuk L.L., Podlesskii K.K., Kosyakova N.A.* // Experim. Geosci. 1996. V. 5. № 2. P. 24–28.
10. *Harley S.L.*, In: What Drives Metamorphism and Metamorphic Reactions? Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1998. P. 81–107.
11. *Holland T.J.B., Powell R.* // J. Metamorph. Geol. 1998. V. 16. № 3. P. 309–343.
12. *Perchuk K.L., Oranovich L.Ya., Podlesskii K.K.* // J. Metamorph. Geol. 1985. V. 3. № 3. P. 265–310.
13. *Podlesskii K.K.* // Bochum. Geol. and Geotech. Arb. 1995. H. 44. S. 269–274.
14. *Podlesskii K.K.* / Experim. Geosci. 1997. V. 6. № 1. P. 22–23.
15. *Powell R., Holland T.J.B.* // Amer. Miner. 1999. V. 84. № 1/2. P. 1–14.

**Здесь не рассматриваются реакции с участием других водосодержащих минералов, безусловно, в этих условиях еще более ограничивающие устойчивость ассоциации $Orx + Sil + Qtz$ в области более низкой температуры.