

**ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ГРАНАТОВ КАК ИНДИКАТОРЫ
P-T УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ГЛУБИННЫХ ПОРОД**

В современных петрологических работах для определения P-T условий образования тех или иных типов глубинных пород обычно используются: 1) равновесные ассоциации минералов, как правило, характеризующиеся широкими полями устойчивости и являющиеся, по существу, относительными показателями P-T условий при прочих равных условиях; 2) составы двух минералов (например, амфибол-плаггиоклаз, ортопироксен-клинопироксен, магнетит-ильменит и др.); здесь определения P и T основаны на характере распределения минералообразующих компонентов между минералами, и результаты определения этих параметров нередко дают заниженные значения, так как отражают обычно самые поздние или последующие стадии обменных равновесий; и 3) состав лишь одного минерала [7], представляющего собой многокомпонентный твердый раствор с широкими вариациями изоморфных замещений катионов в различных структурных позициях (подрешетках). В этом отношении наиболее детально изучены такие минералы, как орто- и клинопироксены, хромшпинелиды, гранаты и, в значительно меньшей мере, шпинелиды магнетитовой серии [4], состав которых служит одним из главных источников получения информации о физико-химических условиях глубинного минералообразования [1-8]. Вместе с тем следует заметить, что, несмотря на широкую распространенность в глубинных породах таких минералов, как гранаты и шпинелиды магнетитовой серии, до настоящего времени остается актуальной проблема эволюции их составов и термодинамической устойчивости в зависимости от P-T условий их образования.

В настоящей работе предпринята попытка использовать опубликованные экспериментальные данные о составе гранатов для интерпретации особенностей поведения некоторых их компонентов, обнаруживающих отчетливые зависимости от P-T условий образования [1, 2, 6, 8 и др.]. Статистический анализ данных выявил ряд интересных особенностей (табл. 1, 2).

Таблица 1

Парные коэффициенты корреляции между составом гранатов и сосуществующим расплавом

Компонент	P	T	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO
P	1	0,81	-	-	-	-	-
T	0,81	1	-0,76	-	-0,79	-	-
SiO ₂	0,79	0,77	-0,70	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	0,77	0,60	-	-	-	-	-
FeO	-0,78	-0,68	-	-	-	-	-
MgO	0,81	0,89	-0,75	-	-	-	-
CaO	-0,66	-0,97	0,71	-	0,89	-	-
Pyr/Alm	0,91	0,90	-0,82	-	-	0,75	-

Примечание. Коэффициенты корреляции соответствуют 95%-му уровню значимости (число анализов в выборке – 8) Прочерк обозначает статистически незначимую связь. Набранные полужирным шрифтом символы и цифры относятся к гранату и отражают зависимость его состава от P и T. Pyr / Alm – пироп-альмандиновое отношение

Коэффициенты парной корреляции между компонентами в гранатах и РТ-условиями

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Pyг	Alm	Gros
SiO ₂	1								
TiO ₂	-0,65	1							
Al ₂ O ₃	0,67	-0,76	1						
FeO	-0,87	0,90	-0,75	1					
MgO	-0,78	0,61	-0,91	0,65	1				
CaO	-0,94	0,54	-0,53	0,83	0,60	1			
Pyг	-0,53	0,47	-0,69	0,45	0,75	0,36	1		
Alm	0,60	-0,46	0,58	-0,51	-0,64	-0,49	-0,90	1	
Gros		-0,29	0,56		-0,60		-0,71	0,34	1
P, кбар	0,34	-0,73	0,32	-0,65	0,43	0,31	0,53	-0,32	-0,30
T°С		0,44	-0,54		0,53		0,71	-0,42	-0,85

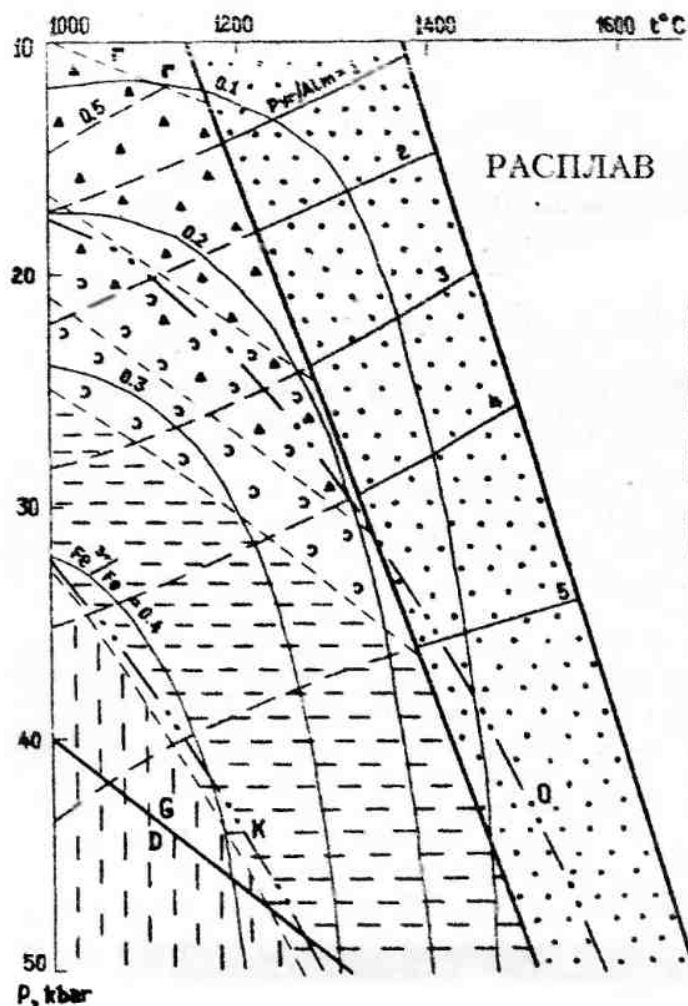
Примечание. Коэффициенты корреляции соответствуют 95%-му уровню значимости. Пропуск означает статистически незначимую связь. При расчете коэффициентов корреляции между компонентами использовалась выборка с числом анализов, равным 50, при расчете от P и T - 26. Pyг, Alm и Gros - соответственно пироповый, альмандиновый и грюсслярный миналы.

Из табл. 1 видно, что все компоненты состава гранатов обнаруживают вполне отчетливо выраженную зависимость от РТ-условий образования, а часть их (за исключением FeO и Al₂O₃) статистически значимо зависят и от состава расплава.

Результаты статистического анализа, частично отраженные в приведенных таблицах, свидетельствуют о том, что одни компоненты весьма существенно зависят от температуры, другие же - от давления. Так, содержание альмандинового и грюсслярного миналов контролируется в основном температурой (коэффициенты корреляции соответственно равны -0,42 и -0,85), тогда как содержание пиропового минала обнаруживает от умеренной до сильной прямую зависимость и от давления, и от температуры (соответственно 0,53 и 0,71). Интересно, что общее железо, составляющее основу альмандинового минала, равно как и титан, обнаруживает от умеренной до сильной отрицательную зависимость от давления (коэффициенты корреляции для них соответственно равны -0,65 и -0,73) при сильной положительной связи (коэффициент корреляции 0,90). Исходя из существующих схем расчета кристаллохимических формул гранатов на $12''O''$, где расчет коэффициентов катионов Fe³⁺ и Fe²⁺ осуществляется по следующей схеме: $Fe^{3+} = 2 - (Al^{VI} + Ti)$ и $Fe^{2+} = Fe - Fe^{3+}$, а также из, в общем, слабой, хотя и статистически значимой зависимости содержания Al₂O₃ от давления (коэффициент корреляции 0,32), следует ожидать, что с давлением (глубинностью) в гранатах должно возрастать отношение Fe³⁺/ΣFe. Наиболее интересно, с нашей точки зрения, изменение степени окисленности железа и пироп-альмандинового отношения в зависимости от РТ-условий образования гранатов. В соответствии с этим нами были рассчитаны их изоплеты с учетом РТ-режима и спроектированы на предполагаемые поля устойчивости гранатсодержащих минеральных ассоциаций глубинных пород (см. рисунок). Диаграмма в наглядной форме иллюстрирует особенности составов гранатов в гранатсодержащих породах различных горизонтов низов земной коры и верхней мантии:

1) Гранаты, характеризующиеся большей окисленностью железа, должны возникать при больших давлениях (на большей глубине) по сравнению с менее "окисленными" гранатами, что находится в соответствии с выводом Д.Х. Грина и А.Э. Рингвуда [1]. В связи с изоморфным замещением в гранатах алюминия хромом и трехвалентным железом, а последнего титаном, в глубинных условиях возможно появление высокохромистых гранатов.

2) Гранаты, образовавшиеся в пределах континентальных щитов и на больших глубинах (Ps > 30 кбар), должны характеризоваться повышенной степенью окисленности железа или хромистостью при пониженной титанистости и высоким пироп-альмандиновом отношении, что видно по пересече-



Геохимические особенности состава гранатов в породах верхней мантии.

1 - габброиды или пироксеновые гранулиты (плаггиоклаз+пироксен ± оливин ± шпинель); 2 - гранатовые гранулиты (гранат+пироксен + плаггиоклаз); 3 - эклогиты (гранат+ пироксен + кварц); 4 - гранатовый перидотит (форстерит+ бедный глинозёмом пироксен +гранат) океанических областей, 5 - гранатовый перидотит континентальных областей; 6 - область субликвидусных ассоциаций: гранатсодержащие фазы, сосуществующие с жидкостью; 7 - изоплеты (линии равных содержаний) пироп-альмандиновых отношений (rut/alm); 8 - линия равновесия графит(G)-алмаз(D), 9 - кривые окисленности железа ($Fe^{3+}/\Sigma Fe$) в гранатах; 10 - геотермические градиенты океанических (O) и континентальных (K) областей.

Диаграмма построена с использованием данных Д.Х.Грина, А. Э.Рингвуда и др.[1]

чению на диаграмме соответствующих серий изоплет с геотермой для континентальных областей. Такие РТ-условия не исключены, в частности, для алмазсодержащих фаций.

3) Гранаты, образовавшиеся в пределах океанических блоков и на меньших глубинах ($P_s < 30$ кбар), наоборот, должны характеризоваться большей восстановленностью железа и титанистостью по сравнению с более глубинными гранатами, что тоже хорошо видно по пересечению соответствующих изоплет с океанической геотермой. Такие условия не исключены также для гранулитовой и эклогитовой зон глубинного метаморфизма.

Таким образом, указанные особенности поведения изоплет ($Fe^{3+}/\Sigma Fe$ и пироп-альмандинового отношения rut/alm) в гранатах могут служить дополнительными критериями, уточняющими РТ-условия образования гранатсодержащих минеральных ассоциаций.

Список литературы

1. Грин Д.Х., Рингвуд А.Э. Петрология верхней мантии. М.: Мир, 1968. С.335
2. Кадик А.А., Луканин О.А., Лапин И.В. Физико-химические условия эволюции базальтовых магм в приповерхностных очагах. М.: Наука, 1989. 346 с.
3. Литвин Ю.А., Ищенко С.А. Ликвидусные фазовые отношения многокомпонентной перидотит-пироксенитовой системы оливин-ортопироксен-клинопироксен-гранат при 40 кбар//Очерки физико-химической петрологии. М., 1991. С.113-138.
4. Poltavets Yu.A. Thermodynamic analysis of stability of magnetite-series spinelides under conditions of abyssal petrogenesis//Experiment in Geosciences. 1996. Vol. 5, N 2. P.27-28
5. Poltavets Yu.A. Ti and $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ -ratio in the garnets as the indicators of relative depth of the garnet-bearing rock formation in the earth's crust and upper mantle //Experiment in Geosciences. 1997. V.6. N2.

6. *Rapp R.P., Watson E.B* Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 kbar. Implications for Cotinental Growth and Crust-Mantle Recycling//*J. Petrology*. 1995. V.36, N 4. P.891-931

7. *Сурков Н.В., Кузнецов Г.Н.* Экспериментальное исследование устойчивости твердых растворов клинопироксенов в ассоциации $\text{Crx}+\text{Orx}+\text{Gr}$ системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ // *Геология и геофизика*. 1996. N 12. P.18-25

8. *Stern Charles R., Wyllie Peter J* Phase compositions through crystalization intervals in basalt-andesite- H_2O at 30 kbar with implications for subduction zone magmas//*The American Mineralogist*. 1978. V. 63, N7-8. P.641-663.