

ФАЗОВЫЕ ОТНОШЕНИЯ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ МОДЕЛЬНОГО ПИРОЛИТА В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМОЙ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ГРАНАТОВ (ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ 2.5, 3.0, 7.0 ГПа И 1400–1800°C)

© 2019 г. Е. А. Матросова^{а,*}, А. А. Бенделиани^{а,б}, А. В. Бобров^{а,б,с},
А. А. Каргальцев^а, Ю. А. Игнатъев^а

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
Россия, 119991 Москва, ул. Косыгина, 19

^бМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Геологический факультет
Россия, 119991 Москва, Ленинские Горы, 1

^сИнститут экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН
Россия, 142432 Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, 4

*e-mail: ekaterina.a.sirotkina@gmail.com

Поступила в редакцию 04.12.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

При изучении частичного плавления модельного пиролита установлено, что гранаты, синтезированные при 7 ГПа в диапазоне температур 1400–1800°C, характеризуются избыточным содержанием кремния (относительно 3 ф.е.), устойчивой примесью Cr₂O₃ и, таким образом, представляют собой твердый раствор пироп-мэйджорит-кноррингитового ряда. Увеличение отношения Cr/Al в стартовом составе приводит к увеличению этого отношения в гранате. С ростом температуры концентрации Cr₂O₃ в рестите уменьшаются, а в расплаве — увеличиваются; при этом отношение Cr/Al увеличивается во всех гранатах (из зон рестита и закаленного расплава). При плавлении модельного пиролита при 2.5 и 3 ГПа оценки валовых составов рестита показали, что концентрации хрома в нем больше, чем в стартовом составе. Все минералы зоны рестита характеризуются высокими содержаниями хрома, и в условиях частичного плавления в шпинелевой фации глубинности хром перераспределяется в рестит. Полученные результаты показывают, что образование высокохромистых гранатов можно связать с протолитом, имеющим высокое отношение Cr/Al, сформировавшимся в виде остатка от частичного плавления в шпинелевой фации глубинности и в дальнейшем перемещенным в гранатовую фацию.

Ключевые слова: кноррингит, мэйджорит, пироп, эксперимент, фазовые отношения, мантия, частичное плавление

DOI: 10.31857/S0016-7525649974-985

ВВЕДЕНИЕ

Важное значение для установления химического и фазового состава глубинных оболочек Земли имеет изучение поведения примесных элементов. В экспериментальных работах растворимости примесных элементов в фазах высокого давления уделяется недостаточное внимание, хотя даже незначительные концентрации этих элементов могут в существенной степени влиять на физические свойства отдельных фаз и мантийных пород в целом. Одним из таких элементов является хром, который, несмотря на невысокие валовые концентрации (не более

0.4 мас.%) в мантии Земли (Ringwood, 1966), способен в значительной степени концентрироваться в глубинных минералах. К числу важнейших хромсодержащих фаз верхней мантии Земли относятся хромшпинель, хромистый пироксен и кноррингитовый гранат, в то время как в оливин хром входит в очень ограниченных количествах. Несмотря на то, что содержание хромшпинели в перидотитах весьма незначительное, обычно именно эта фаза контролирует содержание хрома в валовом составе породы.

Характерные особенности состава сингенетических с алмазом минералов позволили вы-

делить в области устойчивости алмаза дунит-гарцбургитовый парагенезис, для минералов которого отчетливо проявляется снижение содержания железа и кальция и повышение содержания хрома по сравнению с известными типами гипербазитов и алмазосодержащих эклогитов (Соболев, 1974, 1983). Так, концентрации Cr_2O_3 в высокохромистых и низкокальциевых гранатах варьируют в пределах 3.00–20.60 мас. % (Schulze, 1995; Grütter et al., 2004; Stachel, Harris, 1997) при содержании CaO 0.27–3.80 мас. %. Эксперименты с участием кноррингитового компонента граната проводились как в простых модельных системах пироп–кноррингит (Ringwood, 1977; Klemme, 2004; Туркин, Соболев, 2009), мэйджорит–кноррингит (Zou, Irifune, 2012; Sirotkina et al., 2015), пироп–мэйджорит–кноррингит (Сироткина и др., 2016), так и в многокомпонентных системах с природным химизмом (Bulatov et al., 1991). В этих экспериментах установлено, что гранат образует протяженную серию твердых растворов с двумя главными высокобарическими крайними членами — мэйджоритом и кноррингитом.

Н.В. Соболев (1974, 1983) показал, что содержание хрома в гранатах отражает их высокобарическую природу и может рассматриваться в качестве индикатора алмазного парагенезиса. Впоследствии было показано, что высокое содержание хрома в гранате контролируется высоким отношением Cr/Al в протолите в большей степени, чем содержанием хрома в валовом составе породы (Bulatov et al., 1991; Stachel et al., 1998; Grütter, 2001).

В настоящей работе для установления возможности кристаллизации высокохромистого граната и выявления связи его состава с температурой и стартовым составом системы, а также для получения новых количественных данных по распределению хрома между реститом и расплавом была проведена серия опытов по частичному плавлению модельного пиролита в гранатовой (алмазной) фации глубинности. Реконструкция процесса образования высокохромистого протолита (рестита) при частичном плавлении модельного пиролита была проведена в ходе экспериментов в области стабильности хромшпинели при 2.5 и 3.0 ГПа. Для изучения влияния отношения Cr/Al в протолите (стартовом составе) на состав кристаллизующегося граната, а также с целью моделирования процесса образования граната из высокохромистого рестита, образованного в условиях частичного плавления, была проведена серия эксперимен-

тов со стартовым составом с повышенным содержанием хрома (3 мас. % Cr_2O_3) и отношением Cr/Al , моделирующим состав рестита, полученного в сериях опытов при 2.5 и 3.0 ГПа.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная работа проводилась при давлениях 7.0, 3.0, 2.5 ГПа и температурах 1400–1800 °С в камере высокого давления НЛ-13Т с тороидальным уплотнением типа «наковальня с лункой» в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН.

Стартовый состав был представлен модельным пиролитом (мас. %) (Ringwood, 1966): 45.95 SiO_2 , 3.56 Al_2O_3 , 0.50 Cr_2O_3 , 38.12 MgO , 8.13 FeO , 3.15 CaO , 0.58 Na_2O . В специальной серии опытов к этому составу добавлялось 3 мас. % Cr_2O_3 . Оксиды смешивались в необходимых пропорциях (натрий добавлялся в систему в виде Na_2SiO_3), растирались до гомогенного состояния в присутствии этилового спирта. Исходные смеси просушивались в муфельной печи при температуре 100 °С в течение 2 ч. Затем смеси помещались в подготовленную ячейку с нагревателем. Ячейка имеет общий диаметр 30 мм и изготавливается из прессованного карбоната с добавлением небольшого количества Cr_2O_3 . Внутри ячейки располагается графитовый нагреватель диаметром 7 мм и высотой 7.5 мм. Нагреватель в центральной части имеет цилиндрическую полость размером 2.5×2.5 мм, куда помещается экспериментальный (стартовый) материал (Сироткина и др., 2016). В ходе нагрузки объем образца уменьшается до ~1.5 мм³. После экспериментов образцы закалялись путем мгновенного снижения мощности нагрева.

Для оценки давления использовался метод калибровки при комнатной температуре, основанный на изменении электросопротивления висмутовой проволоки во время реперных фазовых переходов в висмуте при 2.55 (Bi I–Bi II), 2.7 (Bi II–Bi III) и 7.7 (Bi III–Bi V) ГПа (Homan, 1975).

Калибровка температуры сочетает в себе изменение с помощью термпар и оценку зависимости температуры от электрической мощности нагрева. В работе использовалась платина–платинородиевая термопара $\text{Pt}_{70}\text{Rh}_{30}/\text{Pt}_{94}\text{Rh}_6$ (ПР30/6). Калибровка температуры проводилась при рабочих давлениях 7 ГПа. Погрешность измерения в центральной части полости для образца составляет ±10 °С.

После опыта каждый образец изучался под бинокляром с целью установления его однородности и выявления структурно-текстурных особенностей. Затем производилось разделение образца на несколько частей таким образом, чтобы в одной из них прослеживалась полная зональность образца. Этот фрагмент погружался в эпоксидную смолу и полировался.

Фазовые составы и химический состав минералов на полированных экспериментальных образцах были определены в Лаборатории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV (Япония), оснащенный энергодисперсионным анализатором INCA Energy-350 и волновым дифракционным спектрометром INCA Wave-500 (Oxford Instrument Ltd., Великобритания). Образцы изучались под углеродным напылением толщиной около 30 нм. Растровые электронные изображения получены в отраженных электронах с ускоряющим напряжением 15 кВ. Количественный микроанализ выполнен по индивидуальным программам оптимизации и стандартизации профилей анализируемых элементов при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда ~15 нА. Локальность анализа 2 мкм.

На основе полученных электронно-зондовых анализов рассчитывались формулы минералов по кислородному методу, в котором количество катионов (в ф.е.) в формуле каждого минерала определяется фиксированным содержанием атомов кислорода. Все полученные образцы в пределах выделенных зон характеризовались структурно-текстурным постоянством, а для слагающих их фаз была выявлена химическая однородность, что подтверждалось сходимостью анализов в центральной и краевой частях зерен. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о достижении равновесия в проведенных опытах.

Из-за того, что в большинстве образцов закаленный расплав фактически представляет собой микрозернистый интерстициальный агрегат, установить его состав прямыми методами (сканирование пучком зонда по площади, использование расфокусированного пучка) практически невозможно. Для оценки валовых составов расплава и рестита был использован балансовый расчет. При этом состав рестита, который необходимо знать при расчете состава расплава, рассчитывался из составов граната/шпинели и оливина, а также модальных содержаний данных фаз. Модальные содержания минералов в образце оценивались в программе СТ-An по изображениям в отраженных электронах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по частичному плавлению модельного пиролита с реальным (0.5 мас.%) и избыточным (3.0 мас.%) содержанием Cr_2O_3 в гранатовой и шпинелевой фациях глубинности проводились при давлениях 7.0, 3.0 и 2.5 ГПа и температуре 1400–1800°C, что позволило синтезировать гранаты и другие фазы широкого разнообразия составов, включая высокохромистые разновидности. Фазы, полученные в экспериментах, включают гранат, хромшпинель, пироксен, оливин и закаленный расплав. Условия опытов и полученные в них фазовые ассоциации приведены в табл. 1.

Фазовые отношения

В опытах при 7.0 ГПа в образцах были установлены следующие фазы: гранат, оливин, пироксен и расплав. Структуры и степень раскристаллизованности продуктов опытов зависели от температуры (рис. 1). Во всех экспериментальных образцах, синтезированных при 7 ГПа, устанавливается зональное строение (рис. 1а) с отчетливым выделением твердофазной зоны гранат-оливинового состава (рестита). Зона

Таблица 1. Условия и результаты экспериментов по частичному плавлению модельного пиролита

Образец	P , ГПа	T , °C	Выдержка, мин.	Фазовая ассоциация
32, 34*	7.0	1600	30	$Grt + Px + Ol$
31, 35*	7.0	1700	20	$L + Grt + Px + Ol$
33, 36*	7.0	1800	10	$L + Grt + Px + Ol$
37	3.0	1500	20	$Grt + Px + Cpx + Ol + Sp$
38	2.5	1400	30	$Px + Ol + Sp$
39	2.5	1500	20	$Grt + Px + Ol + Sp$
40	2.5	1600	10	$L + Grt + Px + Ol + Sp$

* – Пиролит с добавлением 3 мас.% Cr_2O_3 .

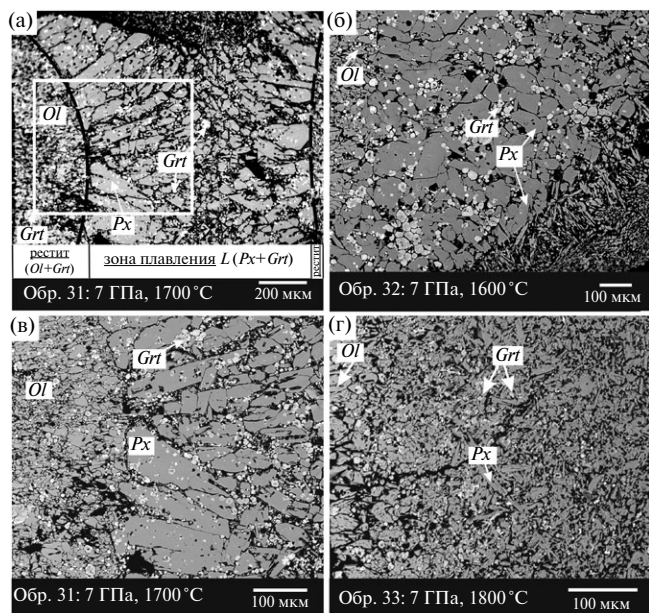


Рис. 1. Фазовый состав и структурные особенности продуктов экспериментов по частичному плавлению модельного пиролиита при 7 ГПа и 1600–1800°C. (а) — зональное строение экспериментального образца с отчетливым выделением твердофазной зоны гранат-оливинового состава (рестита) и зоны плавления; (б) — переход между зонами гранат-оливинового, гранат-пироксенового составов и зоной закаленного расплава; (в) — контакт между зоной рестита с мелкими идиоморфными кристаллами граната с правильными шестиугольными очертаниями и зернами оливина и областью плавления, представленной крупными (до 150 мкм) удлиненными кристаллами пироксена и микрозернистым существенно гранатовым агрегатом в интерстициях (фрагмент фото (а)); (г) — мелкозернистый агрегат закаленного расплава в контакте с узкой зоной существенно оливинового рестита. Изображения в отраженных электронах.

рестита характеризуется наличием изометричных кристаллов граната с правильными шестиугольными очертаниями, а также идиоморфными зернами оливина. С увеличением температуры относительная мощность зоны рестита уменьшается. Зона плавления, наблюдаемая при 1600 и 1700°C, представлена относительно крупными (до 150 мкм) удлиненными кристаллами пироксена и микрозернистым агрегатом пироксен-гранатового состава в интерстициях (рис. 1б, в). Расплав в экспериментальных образцах фиксировался по наличию мелкозернистого закалочного агрегата существенно пироксенового состава (рис. 1г). В закалочной массе гранат образует скопления изометричных (округлых) кристаллов размером до 20 мкм.

Фазы, полученные в экспериментах при 2.5 и 3 ГПа, включают гранат, хромшпинель, оливин, пироксен и расплав. Все образцы характеризуются зональным строением, с отчетливым выделением зон рестита и закаленного расплава. Типичная структура реститовой части образцов (рис. 2), полученных при 2.5 ГПа, представлена относительно крупными изометричными кристаллами оливина (до 60 мкм) и граната (до 50 мкм), а также мелкими, часто интерстициальными, выделениями шпинели (до 15 мкм). Зона расплава представляет собой тонкозернистый закалочный агрегат с мелкими игольчатыми кристаллами пироксена и редкими ксеноморфными выделениями хромшпинели. Интересно, что фазовые ассоциации, полученные при 2.5 ГПа и минимальной температуре (1400°C), характеризуются отсутствием граната, в то время как увеличение температуры (1500–1600°C) приводит к кристаллизации граната в реститовой части образца (рис. 2б).

Установлено, что зону плавления в образце, синтезированном при 3 ГПа и 1500°C, можно разделить на 2 части: (1) зона $Px + Ol + L$ и (2) зона $Px + L$ (рис. 3). Данная зональность определялась как структурными особенностями образца, так и результатами анализа карт распределения химических элементов (рис. 3: Cr, Al, Mg, Si). Пироксены из зоны плавления удлиненные, в то время как оливины характеризуются изометричными очертаниями.

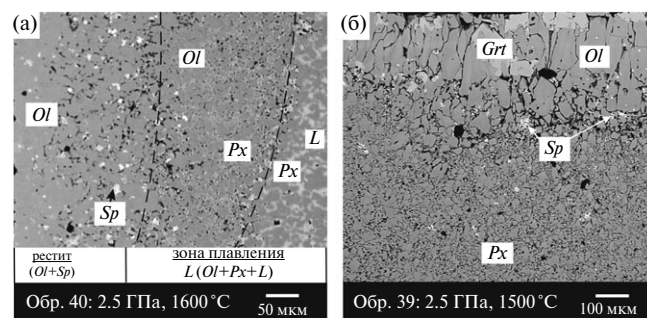


Рис. 2. Фазовый состав и структурные особенности продуктов экспериментов по частичному плавлению модельного пиролиита при 2.5 ГПа и 1500–1600°C. (а) — зональное строение экспериментального образца с отчетливым выделением твердофазной зоны (рестита) и области плавления; (б) — крупные идиоморфные кристаллы оливина (до 150 мкм), относительно крупные кристаллы граната (до 50 мкм) и мелкие, часто интерстициальные, выделения шпинели (до 15 мкм). Изображения в отраженных электронах.

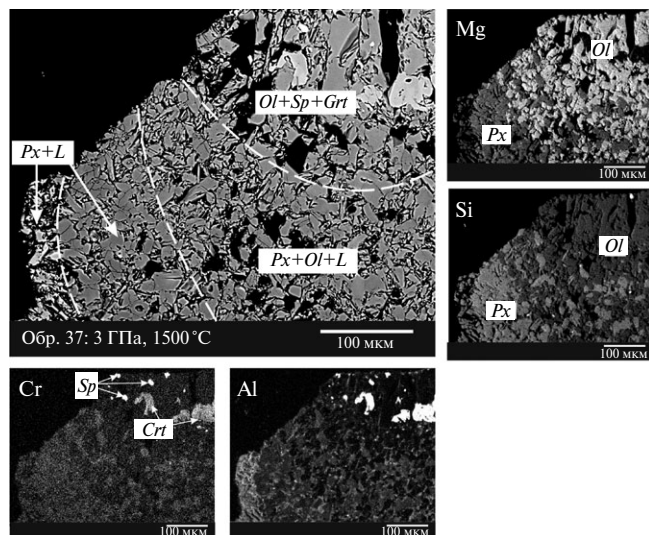


Рис. 3. Структурные особенности и карты распределения элементов в образце, полученном при плавлении модельного пиролита при 3.0 ГПа и 1500 °С. Изображения в отраженных электронах.

Составы фаз

Гранаты, полученные во всех экспериментальных сериях, представляют собой твердый раствор пироба, кноррингита и мэйджорита (табл. 2). Главной особенностью гранатов, синтезированных

ных при 7 ГПа для стартового состава, отвечающего модельному пиролиту (0.5 мас.% Cr_2O_3), является присутствие в них избытка кремния, что определяет отнесение этих минералов к мэйджоритовому типу (Gasparik, 2002). Максимальное содержание мэйджорита соответствует 7 мол.% и характерно для гранатов, синтезированных при 1600 °С (обр. 32). Кроме того, в гранатах из зоны рестита устанавливается устойчивая примесь хрома (до 4.3 мас.%, что соответствует 12 мол.% кноррингитового компонента), в то время как состав граната из закалочного агрегата существенно более хромистый (до 8 мас.% Cr_2O_3). Максимальное содержание кноррингитового компонента (42 мол.%) было зафиксировано в гранате, полученном при температуре 1600 °С (обр. 34). Избыток Si (>3 ф.е.), нарастающий с уменьшением содержания Cr, свидетельствует о вкладе мэйджорит–кноррингитового тренда (Sirotkina et al., 2015) в вариации состава граната. В целом можно отметить, что гранаты, полученные в экспериментах в реститовой части образцов, характеризуются довольно низкими содержаниями Cr_2O_3 , низкими содержаниями CaO и относятся к субкальциевым гранатам дунит-гарцбургитового парагенезиса (рис. 4). Результаты опытов показывают, что получение высокохромистых гранатов, соответ-

Таблица 2. Представительные составы фаз, полученных в экспериментах по частичному плавлению модельного пиролита при 2.5, 3.0 и 7.0 ГПа, 1400–1800 °С

Компонент	P = 7.0 ГПа									
	Обр. 32 (1600 °С)				Обр. 31 (1700 °С)			Обр. 33 (1800 °С)		
	Grt*	Grt	Px	Ol	Grt	Px	Ol	Grt	Px	Ol
SiO ₂	43.13	43.76	58.44	40.66	42.73	58.67	40.1	43.22	57.89	39.7
Al ₂ O ₃	19.36	19.99	0.85	-	19.07	1.12	0.09	20.91	1.22	-
FeO	7.42	6.9	4.86	9.83	7.78	4.82	9.15	8.77	4.68	11.81
MgO	23.04	24.11	36.28	48.56	21.73	36.34	48.53	20.75	35.85	46.5
CaO	3.61	2.89	0.70	0.05	4.77	0.68	-	5.48	0.63	0.08
Na ₂ O	-	-	0.17	-	-	0.12	-	-	0.16	-
Cr ₂ O ₃	3.84	2.88	0.24	0.11	3.59	0.25	0.13	2.24	0.36	0.13
Сумма	100.4	100.53	101.54	99.29	99.67	101.99	98	101.37	100.78	98.31

Формульные единицы, рассчитанные на данное количество атомов кислорода

O	12	12	3	4	12	3	4	12	3	4
Si	3.054	3.070	0.987	1.004	3.063	0.985	1.000	3.048	0.984	1.000
Al	1.615	1.653	0.017	-	1.611	0.022	0.003	1.738	0.024	0.000
Fe	0.439	0.405	0.069	0.203	0.466	0.068	0.191	0.517	0.066	0.249
Mg	2.431	2.519	0.912	1.785	2.32	0.909	1.802	2.18	0.908	1.745
Ca	0.274	0.217	0.013	0.001	0.366	0.012	-	0.414	0.011	0.002
Na	-	-	0.006	-	-	0.004	-	-	0.005	0.000
Cr	0.215	0.159	0.003	0.002	0.203	0.003	0.003	0.125	0.005	0.003
Сумма	8.03	8.023	2.006	2.995	8.029	2.004	2.998	8.021	2.004	2.999

Таблица 2. Продолжение

Компонент	<i>P</i> = 7.0 ГПа							<i>P</i> = 3 ГПа		
	Обр. 34 (1600°C)			Обр. 35 (1700°C)		Обр. 36 (1800°C)		Обр. 37 (1500°C)		
	<i>Grt</i> *	<i>Grt</i>	<i>Px</i>	<i>Grt</i>	<i>Px</i>	<i>Grt</i>	<i>Px</i>	<i>Sp</i>	<i>Grt</i>	<i>Px</i>
SiO ₂	41.21	40.71	58.43	41.99	58.18	41.17	57.84	-	42.08	56.94
Al ₂ O ₃	12.22	13.35	0.42	12.99	0.68	16.51	0.44	45.80	21.93	2.42
FeO	7.62	9.21	5.23	7.1	5.02	9.54	5.07	12.34	7.82	5.98
MgO	20.85	18.94	35.59	21.76	35.68	18.83	35.62	19.31	21.76	34.88
CaO	4.18	5.99	0.51	4.02	0.5	5.56	0.53	0.15	3.46	0.63
Na ₂ O	-	-	0.19	-	0.17	-	0.19	-	-	0.05
Cr ₂ O ₃	14.5	11.22	1.08	12.54	0.95	9.18	1.1	21.51	3.22	0.77
Сумма	100.58	99.43	101.45	100.41	101.18	100.79	100.79	99.12	100.27	101.67

Формульные единицы, рассчитанные на данное количество атомов кислорода

O	12	12	3	12	3	12	3	4	12	3
Si	3.032	3.041	0.990	3.064	0.988	3.005	0.987	-	2.981	1.933
Al	1.059	1.175	0.008	1.117	0.014	1.420	0.009	1.473	1.831	0.097
Fe	0.469	0.575	0.074	0.433	0.071	0.582	0.072	0.282	0.463	0.170
Mg	2.285	2.107	0.899	2.365	0.902	2.048	0.905	0.785	2.296	1.764
Ca	0.329	0.479	0.009	0.314	0.009	0.435	0.010	0.004	0.263	0.023
Na	-	-	0.006	-	0.006	-	0.006	-	-	0.003
Cr	0.843	0.662	0.014	0.723	0.013	0.530	0.015	0.464	0.180	0.021
Сумма	8.017	8.040	2.001	8.016	2.002	8.020	2.004	3.008	8.014	4.010

Таблица 2. Окончание

Компонент	<i>P</i> = 2.5 ГПа									
	Обр. 38 (1400°C)			Обр. 39 (1500°C)				Обр. 40 (1600°C)		
	<i>Sp</i>	<i>Px</i>	<i>Ol</i>	<i>Sp</i>	<i>Px</i>	<i>Grt</i>	<i>Ol</i>	<i>Sp</i>	<i>Grt</i>	<i>Ol</i>
SiO ₂	-	56.4	39.85	-	55.65	41.57	40.63	-	41.52	41.86
Al ₂ O ₃	14.3	2.13	0.09	27.32	3.4	22.58	-	42.72	22.51	0.10
FeO	14.01	5.24	11.97	13.79	5.52	9.33	10.71	11.98	8.64	6.63
MgO	15.71	34.67	47.74	18.54	34.1	18.67	49.06	18.77	19.5	51.97
CaO	0.31	0.91	0.12	0.07	0.55	6.7	0.04	0.07	6.1	0.18
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr ₂ O ₃	58.05	1.17	0.1	41.1	1.29	0.82	0.22	28.32	0.96	0.23
Сумма	102.38	100.52	99.87	100.82	100.51	99.67	100.66	101.86	99.23	100.97

Формульные единицы, рассчитанные на данное количество атомов кислорода

O	4	3	4	4	3	12	4	4	12	4
Si	-	0.967	0.989	-	0.955	2.991	0.993	-	2.988	1.001
Al	0.520	0.043	0.003	0.945	0.069	1.914	-	1.369	1.909	0.003
Fe	0.362	0.075	0.248	0.338	0.079	0.561	0.219	0.272	0.520	0.132
Mg	0.723	0.886	1.764	0.811	0.872	2.001	1.787	0.760	2.090	1.851
Ca	0.010	0.017	0.003	0.002	0.010	0.516	0.001	0.002	0.470	0.005
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr	1.417	0.016	0.002	0.954	0.017	0.047	0.004	0.608	0.055	0.004
Сумма	3.031	2.003	3.009	3.051	2.002	8.029	3.004	3.011	8.031	2.996

* – Отмечены составы мелких гранатов закаленного расплава.

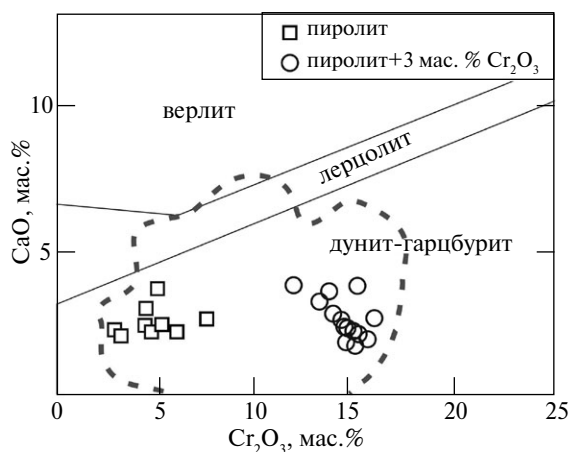


Рис. 4. Диаграмма составов гранатов (зона рестита), полученных в экспериментах по частичному плавлению модельного пиролита при 7.0 ГПа для двух стартовых составов с 0.5 и 3.0 мас.% Cr_2O_3 . Подразделение гранатов на дунит-гарцбургитовый, лерцолитовый и верлитовый типы выполнено с использованием данных Н.В. Соболева (1974). Оконтурировано поле составов гранатов в алмазах ультраосновного парагенезиса в различных месторождениях мира, по (Griffin et al., 1993).

ствующих по составу минералам из включений в алмазах дунит-гарцбургитового парагенезиса, в процессе частичного плавления пиролита в гранатовой фазии глубинности невозможно.

Увеличение содержания хрома в стартовом составе (эксперименты в системе пиролит + 3 мас.% Cr_2O_3) приводит к значительному увеличению отношения Cr/Al в гранатах и, как следствие, к образованию гранатов с существенной долей кноррингитового компонента: в зоне рестита концентрации Cr_2O_3 достигают 12 мас.% (обр. 34), а в закалочных гранатах из зоны плавления — 16 мас.% (обр. 36). Содержание мэйджоритового компонента (избыток кремния) в этих гранатах остается примерно на том же уровне, как в гранатах, полученных в модельном пиролите с 0.5 мас.% Cr_2O_3 (табл. 2).

Как было отмечено выше, в опытах по плавлению модельного пиролита при 3.0 и 2.5 ГПа гранаты были получены в реститовой части образцов в ассоциации с хромшпинелидами в температурном диапазоне 1500–1600°C. Все гранаты в продуктах этих опытов имеют существенно пироповый состав (табл. 2), причем содержание хрома в минералах, синтезированных при 3 ГПа (до 3.6 мас.% Cr_2O_3 , что соответствует 10 мол.% *Knr*), существенно превышает концентрацию хрома в гранатах, полученных при 2.5 ГПа (до 3 мол.% *Knr*). Очевидно, что низкие содержания хрома при данных параметрах связаны с преимущественным перераспределением хро-

ма в хромшпинелиды, сосуществующие с гранатами. Примесь мэйджоритового компонента в этих гранатах отсутствует.

Состав *оливинов*, полученных при изучении частичного плавления пиролита при давлении 2.5 ГПа, зависит от температуры. Характерно, что с ростом температуры увеличивается магнезиальность ($\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) \times 100$) оливина от 88% при 1400°C до 94% при 1600°C. Увеличение температуры также способствует возрастанию содержания хрома в оливине. Максимальное содержание хрома (0.25 мас.% Cr_2O_3) было зафиксировано в оливине, полученном при 1600°C.

Характерной особенностью *пироксенов*, синтезированных при давлении 7 ГПа в ходе изучения стартового состава, отвечающего модельному пиролиту, является присутствие в них примеси хрома (табл. 2), которая возрастает с увеличением температуры до 0.4 мас.% Cr_2O_3 (обр. 33). При таких малых содержаниях хрома сложно рассуждать о механизме вхождения хрома в данную фазу, однако Сироткиной с соавторами (2016) был предложен следующий механизм: $1/2\text{Mg}_{\text{M}_2}^{2+} + \text{Mg}_{\text{M}_1}^{2+} = 1/2\text{vac}_{\text{M}_2} + \text{Cr}_{\text{M}_1}^{3+}$, указывающий на присутствие минала $\text{Mg}_{0.5}\text{CrSi}_2\text{O}_6$. В соответствии с его формулой, хром в структуре пироксена замещает магний в октаэдрах, а на месте магния в 6–8 координационной позиции появляется вакансия.

Содержание алюминия в синтезированных пироксенах (табл. 2) также увеличивается с температурой и достигает 1.2 мас.% Al_2O_3 при 1800°C (обр. 33). Недостаток кремния (относительно 1 ф.е.), который незначительно увеличивается с ростом концентрации алюминия, показывает, что размещение алюминия в пироксене можно описать схемой гетеровалентного изоморфизма типа $\text{Mg}^{2+} + \text{Si}^{4+} = 2\text{Al}^{3+}$, при которой алюминий входит как в октаэдрическую позицию, замещая магний, так и в тетраэдрическую позицию, замещая кремний, в составе ортокорундового (AlAlO_3) компонента пироксена (Berman, Aranovich, 1996).

Добавление хрома к модельному пиролиту приводит к увеличению содержания хрома в пироксенах до 1.1 мас.% Cr_2O_3 , при этом содержание алюминия в них не превышает 0.6 мас.% Al_2O_3 (табл. 2).

Пироксены, синтезированные при давлении 2.5 ГПа, характеризуются повышенными содержаниями хрома (до 1.3 мас.% Cr_2O_3) и алюминия (до 3.4 мас.% Al_2O_3).

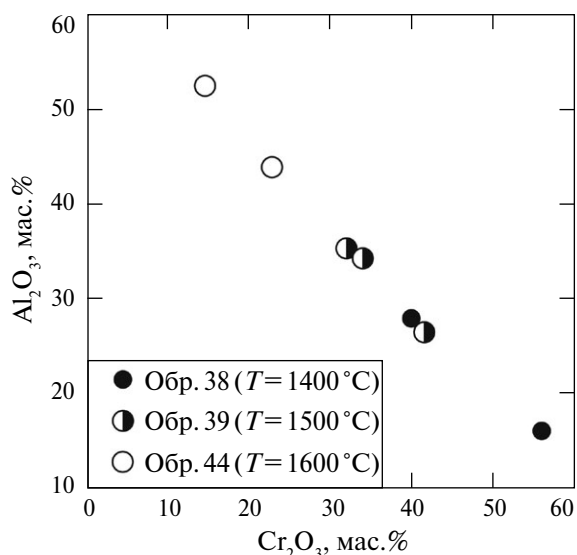


Рис. 5. Особенности состава хромшпинелидов, полученных в экспериментах по частичному плавлению модельного пиrolита при 2.5 ГПа и температурах 1400–1600 °С.

Фазой, наиболее богатой хромом, в образцах, синтезированных при давлении 2.5 ГПа, является *хромшпинель*. Содержание хрома в данной фазе, полученной при минимальной температуре (1400 °С) достигает 58 мас.% Cr_2O_3 (табл. 2). Установлено, что с увеличением температуры в хромшпинелях уменьшается содержание хрома и увеличивается содержание алюминия до 55 мас.% Al_2O_3 (рис. 5). Интересно, что в образцах, синтезированных при 1500 °С и 1600 °С, хромшпинель ассоциирует с гранатом (табл. 1, рис. 2б). На рис. 6 составы хромшпинелидов, полученных в опытах при давлении

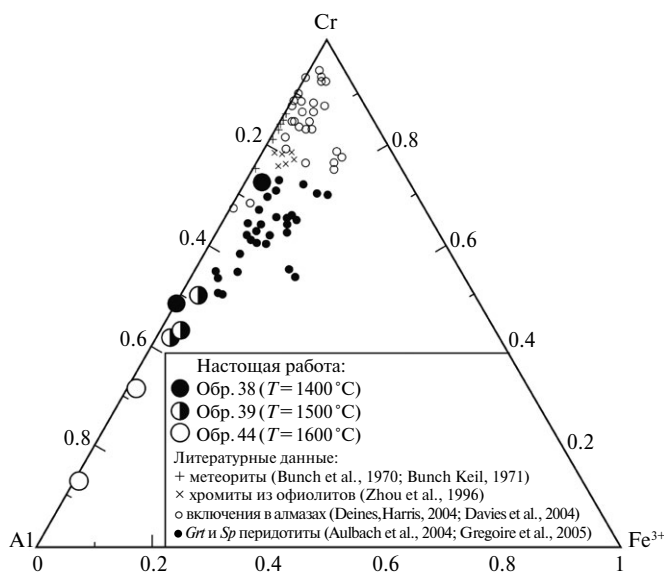


Рис. 6. Сопоставление составов хромшпинелидов, полученных в экспериментах по частичному плавлению модельного пиrolита при 2.5 ГПа и 1400–1600 °С, с составами природных хромшпинелидов.

2.5 ГПа, сопоставлены с составами минералов из включений в алмазах, офиолитов, ксенолитов, перидотитов и метеоритов. Отметим, что по своему составу синтезированные хромшпинелиды довольно далеки от минералов из включений в алмазах и метеоритов, и лишь хромшпинели, полученные при температуре 1400 °С, соответствуют по составу фазам из ксенолитов шпинелевых и гранатовых перидотитов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперименты по частичному плавлению модельного пиrolита в гранатовой фации глубинности показали, что состав полученных гранатов зависит как от температуры, так и от стартового состава экспериментальной системы (табл. 1, 2). При этом содержания хрома в гранатах, установленные в продуктах опытов, значительно уступают максимальным концентрациям Cr_2O_3 в природных гранатах из включений в алмазах ультраосновного парагенезиса (>15 мас.%, рис. 4). В связи с этим можно сделать вывод, что в гранатовой фации глубинности образование гранатов с существенными содержаниями хрома не может происходить в ходе частичного плавления мантийного вещества с низким (до 0.5 мас.%) содержанием Cr_2O_3 , а возможно только при плавлении высокохромистого протолита (стартового состава).

Для установления закономерностей распределения хрома между кристаллическими фазами и расплавом в процессе частичного плавления модельного пиrolита была проведена оценка составов рестита и расплава, полученных в проведенных опытах (табл. 3). Расчеты показали, что увеличение температуры приводит к закономерному увеличению концентрации хрома в расплаве (0.35 мас.% Cr_2O_3 при 1600 °С и 0.51 мас.% Cr_2O_3 при 1800 °С). Для опытов по частичному плавлению пиrolита с добавлением 3 мас.% Cr_2O_3 были установлены те же закономерности: содержание хрома в расплаве увеличивалось от 3.00 мас.% Cr_2O_3 при 1600 °С до 3.06 мас.% Cr_2O_3 при 1800 °С (табл. 3). В раскристаллизованном агрегате расплава мелкие кристаллы граната являются главными концентраторами хрома, и его концентрация в таких гранатах оказывается выше содержания Cr_2O_3 в гранатах реститовой зоны (табл. 2).

Тем самым результаты проведенных экспериментов на количественной основе подтверждают идею (Bulatov et al., 1991; Stachel et al., 1998) о том, что при частичном плавлении пиrolитовой мантии в гранатовой фации глубинности хром перераспределяется в расплав. Важно

Таблица 3. Рассчитанные составы расплава и рестита, оцененные в экспериментах по частичному плавлению модельного пиролита при 7.0 и 2.5 ГПа, 1400–1800°C

Компонент	<i>P</i> = 7.0 ГПа					
	Обр. 32 (1600°C)		Обр. 31 (1700°C)		Обр. 33 (1800°C)	
	рестит	расплав	рестит	расплав	рестит	расплав
SiO ₂	41.63	47.97	41.30	47.43	40.69	47.02
Al ₂ O ₃	5.01	2.87	3.48	3.58	2.08	3.85
FeO	9.14	7.66	8.98	7.94	11.49	7.46
MgO	42.65	36.01	45.06	35.84	44.89	36.77
CaO	0.76	4.27	0.56	3.99	0.41	3.70
Na ₂ O	-	0.85	-	0.77	-	0.70
Cr ₂ O ₃	0.80	0.36	0.62	0.46	0.45	0.51
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cr/Al	0.11	0.08	0.12	0.09	0.14	0.09

Компонент	<i>P</i> = 7.0 ГПа					
	Обр. 34 (1600°C)		Обр. 35 (1700°C)		Обр. 36 (1800°C)	
	рестит	расплав	рестит	расплав	рестит	расплав
SiO ₂	41.04	46.77	41.04	46.36	41.01	46.10
Al ₂ O ₃	3.68	3.36	3.68	3.40	3.10	3.59
FeO	9.01	7.36	9.01	7.42	9.28	7.47
MgO	42.08	34.59	42.08	35.05	42.48	35.37
CaO	1.16	4.08	1.16	3.95	1.32	3.67
Na ₂ O	-	0.86	-	0.81	-	0.75
Cr ₂ O ₃	3.03	2.98	3.03	3.02	2.81	3.04
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cr/Al	0.56	0.59	0.57	0.58	0.72	0.56

Компонент	<i>P</i> = 2.5 ГПа					
	Обр. 38 (1400°C)		Обр. 39 (1500°C)		Обр. 40 (1600°C)	
	рестит	расплав	рестит	расплав	рестит	расплав
SiO ₂	38.58	47.57	38.58	47.25	35.13	47.28
Al ₂ O ₃	2.03	3.89	2.03	3.25	6.91	3.15
FeO	8.20	8.12	8.20	7.80	7.07	8.27
MgO	48.41	35.86	48.41	37.54	46.13	37.14
CaO	0.17	3.81	0.17	3.48	0.25	3.51
Na ₂ O	-	0.71	-	0.66	-	0.65
Cr ₂ O ₃	2.60	0.04	2.60	0.02	4.51	0.01
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cr/Al	0.86	0.01	0.46	<0.01	0.44	<0.01

отметить, что основной причиной невозможности получения высокохромистого рестита в ходе частичного плавления в гранатовой фации глубинности является то, что в гранате — главной хромсодержащей фазе рестита — будет накапливаться не только хром, но и в большей степени алюминий (Сироткина и др., 2016), и в целом отношение Cr/Al в рестите и расплаве будет примерно равным: $D_{Cr/Al}^{рестит/L} \approx 1$ (рис. 7). Характерно, что повышение температуры будет приводить к увеличению этого отношения в рестите.

Для получения высокохромистого рестита, в котором отношение Cr/Al более чем в пять раз

превышает отношение Cr/Al в стартовом пиролите, были проведены эксперименты по частичному плавлению пиролита в поле стабильности шпинели при давлении 2.5 ГПа и температуре 1400–1600°C. Эксперименты показали, что в этих условиях увеличение температуры приводит к более существенному перераспределению хрома в состав рестита (табл. 3, заштрихованная область на рис. 7). Это связано с тем, что при относительно низких давлениях в рестите преобладает хромшпинель, в которой, в отличие от граната, хром концентрируется в большей степени, чем алюминий. Установлено, что

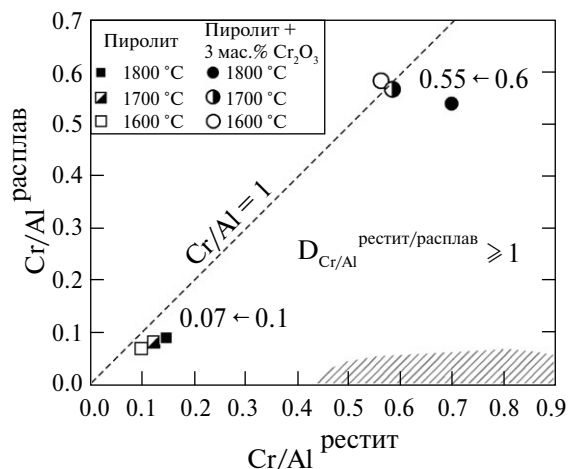


Рис. 7. График зависимости отношений Cr/Al в расплавах и рестилах, полученных в экспериментах по частичному плавлению модельного пиrolита, в том числе с добавлением 3 мас.% Cr_2O_3 , при 7 ГПа и 1600–1800 °С. Цифровые значения на диаграмме — величины Cr/Al в гранатах, направление их изменения с увеличением температуры отмечено стрелками. Заштрихованная область — параметры валового состава расплава и рестита при 2.5 ГПа.

при максимальной температуре проведенных опытов (1600 °С) содержание хрома в рестите (~4.5 мас.% Cr_2O_3) в 9 раз превышает содержание хрома в стартовом составе (0.5 мас.% Cr_2O_3), при этом его рассчитанная концентрация в расплаве не превышает 0.05 мас.% Cr_2O_3 (табл. 3). Предполагается (Kesson, Ringwood, 1989; Canil, Wei, 1992; Stachel et al., 1998), что погружение такого богатого хромом протолита из области стабильности шпинели в гранатовую фацию глубинности должно привести к образованию существенно кноррингитовых гранатов.

Информация о высоких концентрациях хрома в мантийных минералах и возможных высоких валовых концентрациях этого элемента в мантийных породах может быть получена из анализа данных не только по включениям в алмазах, но и по мантийным ксенолитам перидо-

титовой ассоциации, в особенности гранатовым дунитам и гарцбургитам с высокохромистым низкокальциевым гранатом. Так, определение валовых составов некоторых ксенолитов мантийных перидотитов показало (табл. 4), что содержание оксида Cr_2O_3 в них достигает 1.7 мас.% (Schulze, 1995; van Acherbergh et al., 2001; Гаранин и др., 2004; Ionov et al., 2010), что в 2–4 раза превышает содержание хрома в мантии Земли (Ringwood, 1966). При этом содержание хрома в гранатах таких ксенолитов достигает 11 мас.% Cr_2O_3 . Заметим, что приведенные величины валовой концентрации хрома в составе мантийных образований являются далеко не максимальными. Так, в работе (Ivanic, 2007) описаны специфические мегакристы граната (6.42 мас.% Cr_2O_3), образующие сростания с хромшпинелидами и единичными кристаллами пироксена, для которых рассчитанная валовая концентрация Cr_2O_3 составляет 10.28 мас.%.

В настоящей работе количественная оценка влияния отношения Cr/Al в протолите на состав граната в экспериментах по частичному плавлению высокохромистого протолита, близкого по составу к полученному в сериях опытов при 2.5 и 3.0 ГПа, была проведена в опытах при 7 ГПа с добавлением к стартовым составам модельного протолита 3 мас.% Cr_2O_3 . Высокохромистые низкокальциевые гранаты, полученные в этих экспериментах, по составу соответствуют гранатам из включений в природных алмазах дунит-гарцбургитового парагенезиса с содержанием хрома до 14 мас.% Cr_2O_3 (рис. 4).

Расчеты составов рестита и расплава в этой серии опытов показали, что увеличение температуры приводит к перераспределению хрома в расплав (до 3.1 мас.% Cr_2O_3), в то время как содержание хрома в рестите оказывается ниже его валовой концентрации в образце (до 2.9 мас.% Cr_2O_3). Как и в случае модельного пиrolита с 0.5 мас.% Cr_2O_3 , это сопровождается пониже-

Таблица 4. Сопоставление валового содержания хрома в мантийных ксенолитах пироповых перидотитов, содержания хрома в гранате и модального количества граната в ксенолитах

Cr_2O_3 в мантийных ксенолитах, мас. %	Cr_2O_3 в гранате, мас. %	Содержание <i>Grt</i> в ксенолитах, об. %	Ссылка
1.7	4.24	40	(Гаранин и др., 2004)
1.29	11	12	(van Acherbergh et al., 2001)
0.8	7.6	10	(van Acherbergh et al., 2001)
0.77	9.8	7	(Ionov et al., 2010)
0.68	7.06	9	(Schulze, 1995)
0.643	9.3	6	(Ionov et al., 2010)
0.47	7.91	6	(Schulze, 1995)

нием отношений Cr/Al в гранатах (рис. 7), однако на уровне существенно более высоких значений (от 0.6 при 1600°C до 0.55 при 1800°C).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментов по частичному плавлению модельного пиролита в гранатовой (алмазной) фации глубинности и в области стабильности хромшпинели можно сделать следующие выводы.

1. Процессы частичного плавления мантийного субстрата в гранатовой фации глубинности не будут приводить к образованию высокохромистого рестита, так как в гранате будет накапливаться не только хром, но и, в большей степени, алюминий. Увеличение давления также не будет приводить к образованию высокохромистого граната из-за возрастающей роли мэйджоритового компонента (Sirotkina et al., 2015).

2. На состав граната помимо температуры и давления влияет также отношение Cr/Al в валовом составе породы. Высокое содержание хрома в гранате контролируется высоким отношением Cr/Al в протолите в большей степени, чем содержанием Cr₂O₃ в валовом составе породы.

3. Новые экспериментальные результаты дают количественное подтверждение идеи о том, что образование протолита с высоким отношением Cr/Al возможно в результате частичного плавления пиролита в шпинелевой фации глубинности, где в шпинели рестита будет накапливаться хром в большей степени, чем алюминий.

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-17-01169).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гаранин В.К., Гаранин К.В., Васильева Е.Р., Веричев Е.М., Костровицкий С.И., Кудрявцева Г.П., Писарев П.А. (2004) Минералогия мантийных ксенолитов из алмазоносной кимберлитовой трубки им. В. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция). Статья 1. Перидотиты, пироксениты, эклогиты. *Изв. вузов. Геология и разведка* (6), 26–30.

Сироткина Е.А., Бобров А.В., Каргальцев А.А., Игнатьев Ю.А., Кадик А.А. (2016) Влияние малых концентраций алюминия на состав и условия кристаллизации мэйджорит-кноррингитовых гранатов: эксперимент при 7.0 ГПа и 1500–1700°C. *Геохимия* (7), 596–606.

Sirotkina E.A., Bobrov A.V., Kargal'tsev A.A., Ignat'ev Yu. A., Kadik A.A. (2016) The influence of low aluminum concentrations on the composition and conditions of

crystallization of majorite-knorringtonite garnets: experiment at 7.0 GPa and 1500–1700°C. *Geochem. Int.* **54** (7), 584–593.

Соболев Н.В. (1974) Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 264 с.

Соболев Н.В. (1983) Парагенезисы алмаза и проблема глубинного минералообразования Зап. ВМО **112** (4), 389–396.

Туркин А.И., Соболев Н. В. (2009) Пироп-кноррингитовые гранаты: обзор экспериментальных данных и природных парагенезисов. *Геология и геофизика* **50** (12), 1506–1523.

Aulbach S., Griffin W.L., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., Kivi K., Doyle B.J. (2004) Mantle formation and evolution, Slave Craton: constraints from HSE abundances and Re-Os isotope systematics of sulfide inclusions in mantle xenocrysts. *Chem. Geol.* **208** (1), 61–88.

Berman R.G., Aranovich L.Y. (1996) Optimized standard state and solution properties of minerals: I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system FeO–MgO–CaO–Al₂O₃–TiO₂–SiO₂. *Contrib Mineral Petrol.* **126**, 1–24.

Bulatov V., Brey G.P., Foley S.F. (1991) Origin of low-Ca, high-Cr garnets by recrystallization of low-pressure harzburgites. *5th International kimberlite conference, extended abstracts, CPRM, special publication* **91**, 29–31.

Bunch T.E., Keil K., Olsen E. (1970) Mineralogy and petrology of silicate inclusions in iron meteorites. *Contrib. Mineral. Petrol.* **25**, 297–340.

Bunch T.E., Keil K. (1971) Chromite and ilmenite in non-chondritic meteorites. *American Mineralogist.* **56**, 146–157.

Canil D., Wei K.J. (1992) Constraints on the origin of mantle-derived low Ca garnets. *Contrib Mineral Petrol.* **109**, 421–430.

Davies R.M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., McCandless T.E. (2004) Inclusions in diamond from the K14 and K10 kimberlites, Buffalo Hills, Alberta, Canada: diamond growth in a plume. *Lithos* **77**, 99–111.

Deines P., Harris J.W. (2004) New insights into the occurrence of ¹³C-depleted carbon in the mantle from two closely associated kimberlites: Letlhakane and Opara, Botswana. *Lithos* **77**, 1–4.

Gasparik T. (2002) Experimental investigations of the origin majoritic garnet inclusions in diamonds. *Phys. Chem. Minerals* **29**, 170–180.

Gregoire M., Bell D.R., Le Roex A.P. (2006) Garnet lherzolites from the Kaapvaal Craton (South Africa): Trace element evidence for a metasomatic history. *J. Petrol.* **44**, 629–657.

Griffin W.L., Sobolev N.V., Ryan C.G., Pokhilenko N.P., Win T.T., Yefimova E.S. (1993) Trace elements in garnets and chromites: diamond formation in the Siberian lithosphere. *Lithosphere* **29**, 235–256.

Grütter H.S. (2001) The genesis of high Cr/Al garnet peridotite, with implications for cratonic crust: mantle architecture. The Slave-Kaapvaal workshop. Merrickville.

Grütter H.S., Gurney J.J., Menzies A.H., Winter F. (2004) An updated classification scheme for mantle-derived garnet, for use by diamond explorers. *Lithos* **77**, 841–857.

- Homan C.G. (1975) Phase diagram of Bi up to 140 kbars. *J. Phys. Chem. Solids*, **36**, 1249–1254.
- Ionov D.A., Doucet L. S., Ashchepkov I.V. (2010) Composition of the lithospheric mantle in the Siberian Craton: new constraints from fresh peridotites in the Udachnaya-East kimberlite. *J. Petrol.* **51**, 2177–2210.
- Ivanic T.J. (2007) The chromite–garnet peridotite assemblages and their role in the evolution of the mantle lithosphere. PhD Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh. 2007.
- Kesson S.E., Ringwood A.E. (1989) Slab–mantle interactions: 2. The formation of diamonds. *Chem. Geol.* **78**, 97–118.
- Klemme S. (2004) The influence of Cr on the garnet–spinel transition in the Earth's mantle: experiments in the system MgO–Cr₂O₃–SiO₂ and thermodynamic modeling. *Lithos* **77**, 639–646.
- Ringwood A.E. (1966) The chemical composition and origin of the Earth. *Advances in Earth Science*, 287–356.
- Ringwood A.E. (1977) Synthesis of pyrope–knorringite solid–solution series. *Earth Planet. Sci. Lett.* **36**, 443–448.
- Schulze D.J. (1995) Low-Ca garnet harzburgites from Kimberley, South Africa: Abundance and bearing on the structure and evolution of the lithosphere. *J. Geophys. Res.:Solid Earth* **617**, 12513–12526.
- Sirotkina E.A., Bobrov A.V., Bindi L., Irifune T. (2015) Phase relations and formation of chromium-rich phases in the system Mg₄Si₄O₁₂–Mg₃Cr₂Si₃O₁₂ at 10–24 GPa and 1600°C. *Contrib. Mineral. Petrol.* **169** (1), 1–14; doi 10.1007/s00410-014-1097-0.
- Stachel T., Viljoen K.S., Brey G., Harris J.W. (1998) Metasomatic processes in lherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle: REE in garnets from xenoliths and inclusions in diamonds. *Earth Planet Sci Lett.* **159**, 1–12.
- Stachel T., Harris J.W. (1997) Diamond precipitation and mantle metasomatism–evidence from the trace element chemistry of silicate inclusions in diamonds from Akwatia, Ghana. *Contrib. Mineral. Petrol.* **129** (2–3), 143–154.
- Van Achtebergh E., Griffin W.L., Stiefenhofer J. (2001) Metasomatism in mantle xenoliths from the Letlhakane kimberlites: estimation of element fluxes. *Contrib. Mineral. Petrol.* **141**, 397–414.
- Zhou M.F., Robinson P.T., Malpas J., Li Z. (1996) Podiform chromitites from the ophiolite (Southern Tibet): implications for melt/rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *J. Petrol.* **37**, 3–21.
- Zou Y., Irifune T. (2012) Phase relations in Mg₃Cr₂Si₃O₁₂ and formation of majoritic knorringite garnet at high pressure and high temperature. *J. Mineral. Petrol. Sci.* **107**, 197–205.

PHASE RELATIONS IN THE MODEL PYROLITE AT 2.5, 3.0, 7.0 GPa AND 1400–1800°C: EVIDENCE FOR THE FORMATION OF HIGH-CHROMIUM GARNETS

© 2019 E. A. Matrosova^{a,*}, A. A. Bendeliani^{a,b}, A. V. Bobrov^{a,b,c},
A. A. Kargal'tsev^a, Yu. A. Ignat'ev^a

^aVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Kosygina str., 19

^bLomonosov Moscow State University, Faculty of Geology
Russia, 119991 Moscow, Leninskie Gory, 1

^cD.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy of Russian Academy of Sciences
Russia, 142432 Chernogolovka, Moscow region, Acad. Osip'yan str., 4

*e-mail: ekaterina.a.sirotkina@gmail.com

Received: 04.12.2018

Received version received: 31.01.2019

Accepted: 05.02.2019

Based on study of partial melting in the model pyrolite, it is shown that garnets synthesized at 7.0 GPa in a temperature range of 1400–1800°C are characterized by an excessive Si content (in relation to 3 f.u.), stable admixture of Cr₂O₃, and, thus, represent a solid solution of the pyrope–majorite–knorringite composition. Increase in the Cr/Al value in the starting composition results in increase of this ratio in garnet. With increasing temperature, the concentration of Cr₂O₃ decreases in restite and increases in melt. Cr/Al increases in all garnets from the zone of restite and from the quenched melt aggregate. Estimates of the bulk compositions of restite formed by partial melting of the model pyrolite at 2.5 and 3.0 GPa show that the concentration of Cr in it is higher than that in the starting composition. All minerals from the zone of restite are characterized by the high Cr concentrations, and upon partial melting in the spinel–depth facies, Cr is redistributed to restite. Our results show that the formation of high-chromium garnets relates to the protolith with the high Cr/Al value formed as a residue from partial melting in the spinel–depth facies and further transported to the garnet facies.

Keywords: knorringite, majorite, pyrope, experiment, phase relations, mantle, partial melting

(For citation: Matrosova E.A., Bendeliani A.A., Bobrov A.V., Kargal'tsev A.A., Ignat'ev Yu.A. Phase Relations in the Model Pyrolite at 2.5, 3.0, 7.0 GPa and 1400–1800°C: Evidence for the Formation of High-Chromium Garnets. *Geokhimiya*. 2019;64(9):974–985. DOI: 10.31857/S0016-7525649974-985)