

УДК 551.14:550.4

ПРИРОДА ГЕТЕРОГЕННОСТИ ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ГРАНАТОВ В КСЕНОЛИТЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО ЛЕРЦОЛИТА ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ УДАЧНАЯ (ЯКУТИЯ)

© 2021 г. Академик РАН В. С. Шацкий^{1,2,3}, *, А. Л. Рагозин^{1,2}, Е. С. Ситникова^{1,2}

Поступило 16.04.2020 г.

После доработки 09.09.2021 г.

Принято к публикации 09.09.2021 г.

Значительные вариации состава гранатов как в пределах отдельных зерен, так и в породе в целом устанавлены в ксенолите деформированного гранатового лерцолита из кимберлитовой трубки Удачная. Центральные части зерен, отвечающие по составу гранатам лерцолитового парагенезиса, демонстрируют синусоидально распределение редкоземельных элементов (РЗЭ). В то же время краевые части имеют распределение, характерное для мегакристаллов гранатов из кимберлитов. Несмотря на деплетированность в отношении Y и тяжелых РЗЭ, ядра демонстрируют обогащенность легкими редкими землями, Nb, Ta, Th, U относительно граната из примитивного гранатового перидотита. По распределению РЗЭ модельные расплавы, равновесные с краевыми частями граната, близки к кимберлиту, но значительно обогащены по сравнению с кимберлитом Nb, Ta и Hf и обеднены Sr. Расплавы, равновесные с центральными частями граната, характеризуются более крутым отрицательным наклоном в области тяжелых и средних РЗЭ, приближаясь к кимберлиту в области легких РЗЭ. На основании полученных данных выделяется несколько стадий в эволюции деформированного гранатового лерцолита. Первая стадия предполагает взаимодействие деплетированного перидотита с расплавом, по составу близким к карбонатитовым расплавам. С этим этапом связано образование граната с синусоидальным распределением РЗЭ. На следующей стадии, которой предшествовало растворение зерен граната, образовались каймы граната с повышенным содержанием Ti, Zr, Y, и появился клинопироксен. На заключительном этапе происходило плавление граната, вызванное поступлением водно-углекислотного флюида с высоким содержанием калия, приведшее к образованию полиминеральных включений и келифитовых кайм.

Ключевые слова: верхняя мантия, перидотит, мантийный метасоматоз

DOI: 10.31857/S2686739721120100

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время считается, что в процессе метасоматоза гранаты из перидотитовых ксенолитов с синусоидальным распределением РЗЭ развиваются в сторону типично магматических гранатов [1]. Согласно [2], деформированные гранатовые лерцолиты Каапвальского кратона претерпели многостадийный метасоматоз. Предполагается, что протолитами этих пород были шпинелевые перидотиты, претерпевшие высокие степени частичного плавления на малых глуби-

нах. Впоследствии, в архее, эти рестины подверглись метасоматозу в зоне субдукции. Незадолго до внедрения они были метасоматизированы расплавом, подобным кимберлиту. В ходе этого этапа образовался клинопироксен и новообразованный гранат.

У зональных зерен гранатов в ксенолитах деформированных гранатовых лерцолитов может наблюдаться нормальное и синусоидальное распределение редкоземельных элементов (РЗЭ), что свидетельствует о том, что микрогетерогенность появилась незадолго до внедрения кимберлита [3, 4]. Это подтверждается широким интервалом неодимовой изотопной систематики этих гранатов [5]. Помимо значительных вариаций РЗЭ, у гранатов могут наблюдаться широкие вариации в содержаниях циркония, иттрия, галлия и стронция как в пределах одного зерна граната, так и в разных зернах одного образца [5]. Вариации РЗЭ приводят к вариациям Sm/Nd- и Lu/Hf-отношений.

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: shatsky@igm.nsc.ru

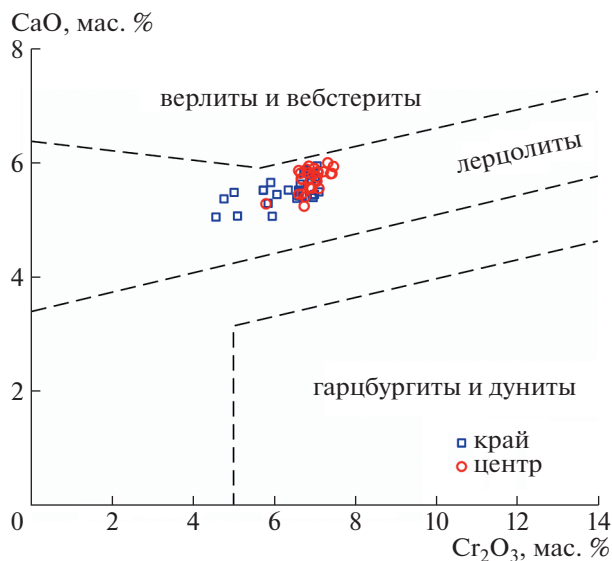


Рис. 1. Состав гранатов из деформированного перидотита Уд11–04 на диаграмме Cr₂O₃–CaO.

При изучении ксенолитов деформированных гранатовых лерцолитов трубки Удачная нами были установлены значительные вариации состава гранатов как в пределах отдельных зерен, так и в породе в целом. С целью определения причин выявленной микрогетерогенности нами проведены детальные минералого-геохимические исследования образца деформированного гранатового лерцолита Уд 11–04, размером 20 × 15 см, отобранного из уникально свежего кимберлита восточного тела трубки Удачная [6].

МЕТОДЫ

Определение содержаний редких элементов в минералах проводилось методом масс-спектрометрии с использованием квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой XSERIES2 (“Thermo Scientific”), объединенного с устройством лазерного пробоотбора (абляции) с длиной волны 213 нм (New Wave Research), диаметр лазерного пучка 50 мкм (Новосибирский государственный университет). Химический состав (концентрации главных элементов) определяли в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований (ИГМ СО РАН) с помощью метода рентгеноспектрального микроанализа с использованием электронного микрозонда “JEOL” JXA 8100 (локальность пучка 2 мкм при силе тока 20 нА и напряжении 15 кВ), а также помощью метода энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на сканирующем электронном микроскопе “Tescan” MIRA3 LMU с использованием программного обеспечения для микроанализа Aztec Energy/Xmax 50 EDS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранатовый лерцолит Уд 11–04 характеризуется мозаично-порфирукластической структурой (10% < порфирукластов оливина) [7]. Порфирукласты представлены редкими зернами оливина (2–4 мм), ортопироксеном (0.5–3 мм) и округлыми зернами граната (1–4 мм). Размер необластов оливина не превышает 0.5 мм. Клинопироксен и гранат неравномерно распределены в объеме ксенолита. Содержание ортопироксена составляет 7–8 об. %, граната – 2 об. %, клинопироксена – <1–2 об. %.

В ксенолите установлены вариации в составе зерен граната как в пределах одного зерна, так и в объеме ксенолита. С целью установления масштабов неоднородности состава гранатов в шлифах, выпиленных из разных частей ксенолита, было исследовано 30 зерен граната. У гранатов наблюдаются вариации в содержаниях TiO₂ (0.09–1.25 мас. %), Cr₂O₃ (4.57–7.46 мас. %), CaO (5.04–5.99 мас. %), FeO (6.89–8.42 мас. %), MgO (19.3–20.9 мас. %), Al₂O₃ (16.4–18.1 мас. %). Магнезиальность (#Mg=100*MgO/(MgO+FeO)) варьирует от 81 до 82%. На диаграмме CaO–Cr₂O₃ [8] точки состава гранатов ложатся вдоль лерцолитового тренда (рис. 1).

На рис. 2, 3 приведены профили распределения элементов в зернах двух гранатов. Наибольшие вариации наблюдаются в содержании титана и хрома. В гранате-1 (рис. 2) содержание Cr₂O₃ от центра к краю зерна уменьшается от 7.5 до 5.5 мас. %, а содержание TiO₂ увеличивается от 0.2 до 1.26 мас. %. Содержания магния и железа возрастают, при этом магнезиальность остается постоянной (82%). В гранате 2 (рис. 3) содержание Cr₂O₃ от центра к краю меняется от 7.37 до 6.7 мас. %, TiO₂ – от 0.16 до 1.03 мас. %, FeO – от 7.47 до 8.08 мас. %. Профили распределения всех элементов имеют U-образный характер. Выделяются центральные области с постоянным содержанием элементов и области, в которых наблюдается уменьшение или увеличение содержания элементов (рис. 2, 3). В гранате-1 профиль распределения хрома (рис. 2б) имеет асимметричный характер. Центральная часть с постоянным содержанием хрома имеет протяженность 1300 мкм. С одной стороны зерна, на расстоянии 430 мкм от края, отмечается плавное снижение содержания хрома. В то же время с другой стороны зерна выделяются три участка – участок плавного снижения протяженностью 320 мкм, участок с постоянным содержанием Cr протяженностью 300 мкм и краевая часть, где содержание хрома вновь резко уменьшается. Другой характер зональности наблюдается у титана (рис. 2 в). Содержание этого элемента постоянно в центральной части зерна протяженностью около 740 мкм. Следует отметить, что несмотря на значительные колебания содержаний

титана и хрома, магнезиальность гранатов меняется в достаточно узком пределе (от 82.5 до 81.4%).

На рис. 4 приведены карты распределения элементов в гранате-1. На карте распределения хрома видно, что гранат с высоким содержанием хрома был резорбирован, а затем на него выросла кайма нового граната с пониженным содержанием хрома. Распределение титана имеет более сложный характер. Выделяются центральная область с низким содержанием титана, промежуточная область и внешняя зона. В области с постоянным содержанием хрома содержание титана меняется (рис. 4а, 4б).

Пироксены в ксенолите имеют достаточно выдержанный состав, характеризуются высокой магнезиальностью ($Mg\# = 91\%$) и содержат 0.60–0.62 мас. % примеси Al_2O_3 . В клинопироксене наблюдаются относительно небольшие вариации состава. Содержание Cr_2O_3 меняется от 0.74 до 1.63 мас. %, Na_2O – от 1.31 до 1.86 мас. %, $Mg\#$ – от 91 до 93%.

В гранатах ксенолита присутствуют полиминеральные включения, размер которых достигает 250 мкм (рис. 5). Методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния определен фазовый состав включений, а также минералов, присутствующих в межзерновом пространстве. Полиминеральные включения сложены ортопироксеном, клинопироксеном, оливином, хромитом, содалитом, флогопитом, калиевым полевым шпатом (рис. 5). Следует отметить большие вариации в соотношении минеральных фаз включений. В одних включениях преобладающей фазой является оливин, в других клино- и ортопироксены. Составы оливинов в этих включениях идентичны по содержаниям главных компонентов, но отличаются по концентрациям никеля и хрома. Вокруг включений развивается ореол, состоящий главным образом из зерен ортопироксена и клинопироксена с дендритными кристаллами хромита (рис. 5).

Ортопироксен включений характеризуется высоким содержанием Al_2O_3 , варьирующим от 4.9 до 11.5 мас. % (табл. 1). В клинопироксене содержание Al_2O_3 достигает 11.6 мас. % (табл. 1). В то же время ортопироксен и клинопироксен матрикса породы содержат 0.61 и 1.7 мас. % Al_2O_3 , соответственно. Хромит, присутствующий во включениях, демонстрирует большую неоднородность по составу (табл. 1). Центр одного зерна содержит 41.5 мас. % Cr_2O_3 , в то время как краевая часть – 20.4 мас. %. В то же время от центра к краю растет магнезиальность – от 56 до 72%. Отношение $100 \cdot Cr / (Cr + Al)$ варьирует от 62 до 42%. Состав слюд включений отвечает флогопиту. Содержание Al_2O_3 в слюдах варьирует от 13.4 до 7.64 мас. %. Флогопит содержит примесь хрома (до 2.62 мас. %).

Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией определены содержания рассеянных элементов в гранатах, полиминеральных включениях и келифитовых каймах. В гранате-1 содержание элементов определено в 15 точках в двух профилях, пересекающих зерно (рис. 2а). В гранате-2 выполнен один профиль, пересекающий зерно (рис. 3а).

Центральные части граната с высоким содержанием хрома имеют синусоидальное распределение редкоземельных элементов. В то же время средняя зона и краевые части имеют распределение, характерное для гранатов магматического происхождения. У них наблюдаются ровное распределение в области тяжелых РЗЭ и крутой положительный наклон от La до Eu.

Центральная область граната характеризуется низким содержанием TiO_2 (0.1–0.2 мас. %), Y (3.5–3.7 ppm), Zr (17–27 ppm) и по этим характеристикам отвечает, согласно Гриффину и соавт. [4], деплетированным гранатам. Промежуточная зона характеризуется U-образным распределением элементов, в то время как краевая зона имеет S-образное распределение. Особенно ярко это выражено на кривых распределения циркония и титана. В профиле, в котором проанализирован редкоэлементный состав, в первой и десятой точках проанализирован состав келифитовой каймы. На графиках видно, что келифитовая кайма имеет характер распределения РЗЭ, отвечающий гранатам лерцолитового парагенезиса. В ней отмечается повышенное содержание Sr, Ba, Rb.

Отдельные участки пироксенов ксенолита содержат большое количество мелких черных включений. Эти включения расположены как по периферии зерен, так и внутри зерен, вдоль залеченных трещин. Был определен редкоэлементный состав участков зерен, не содержащих включений, и участков с большим количеством включений. Полученные данные свидетельствуют о том, что участки пироксена, содержащие включения, обогащены Sr, LREE (легкими РЗЭ), Nb, Hf, U, Th, Ba, Rb. Расчеты показывают, что наблюдаемые профили распределения редких элементов в участках, обогащенных включениями, могут объясняться добавлением 4% расплава/флюида, по составу аналогичного кимберлиту трубки Удачная Восточная [6] (рис. 6а).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Агашев и соавт. [9] на основании исследования ксенолитов деформированных лерцолитов кимберлитовой трубки Удачная выделили три этапа метасоматоза. Первый криптовый метасоматоз флюидами/расплавами карбонатитового состава, в результате которого образовались высокохромистые субкальциевые гранаты с синусо-

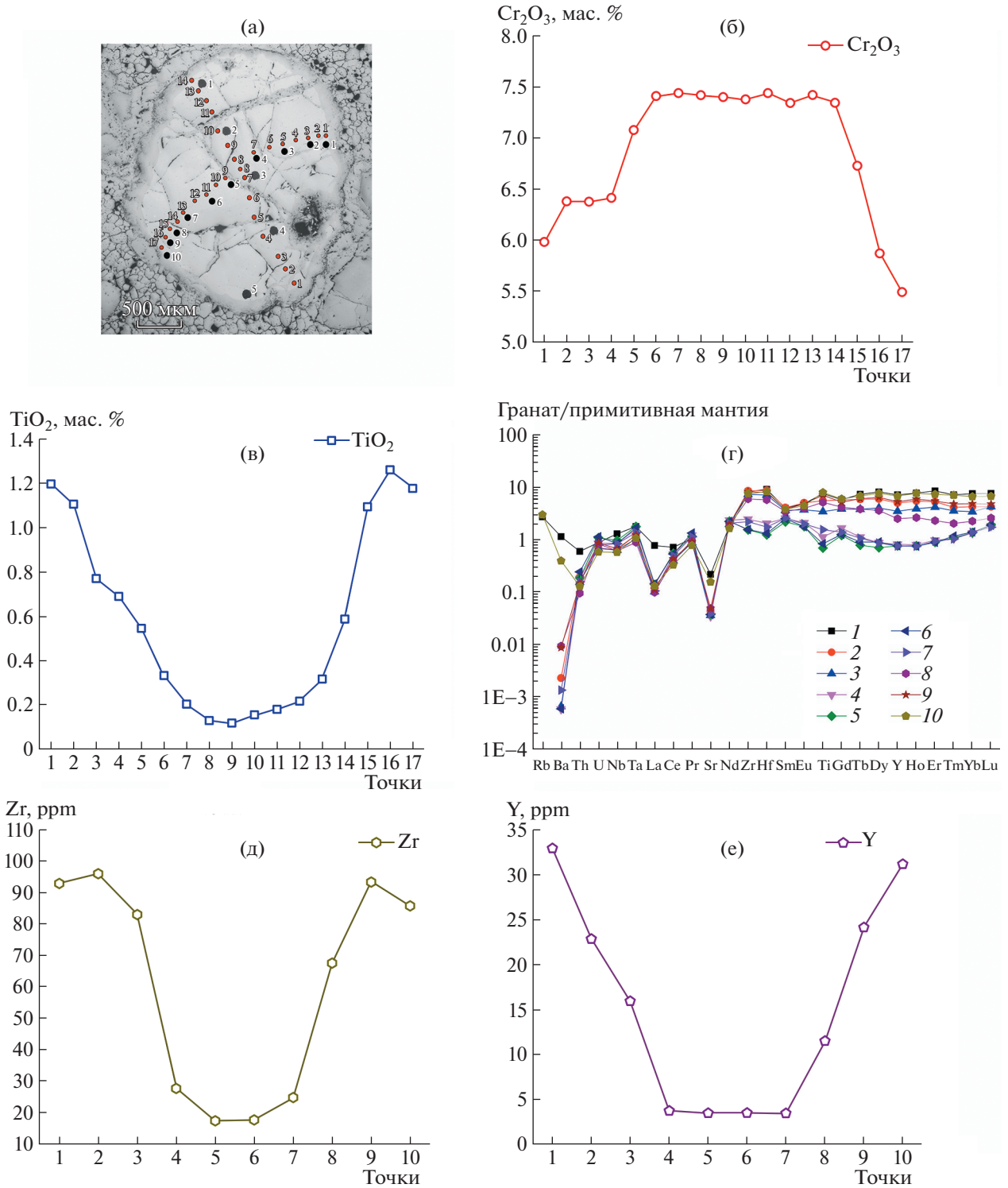


Рис. 2. Распределение главных и редких элементов в зерне граната-1. (а) – зерно граната в отраженном свете с точками определения главных элементов (показаны красными кругами) и точками лазерной абляции, (б) – распределение Cr₂O₃ и (в) – распределение TiO₂; (г) – распределение несовместимых элементов, нормированных на примитивную мантию [17]; (д) – распределение Zr, (е) – распределение Y. Цифры на оси абсцисс на графиках распределения элементов (б, в, д, е) соответствуют номерам точек на рис. 4а.

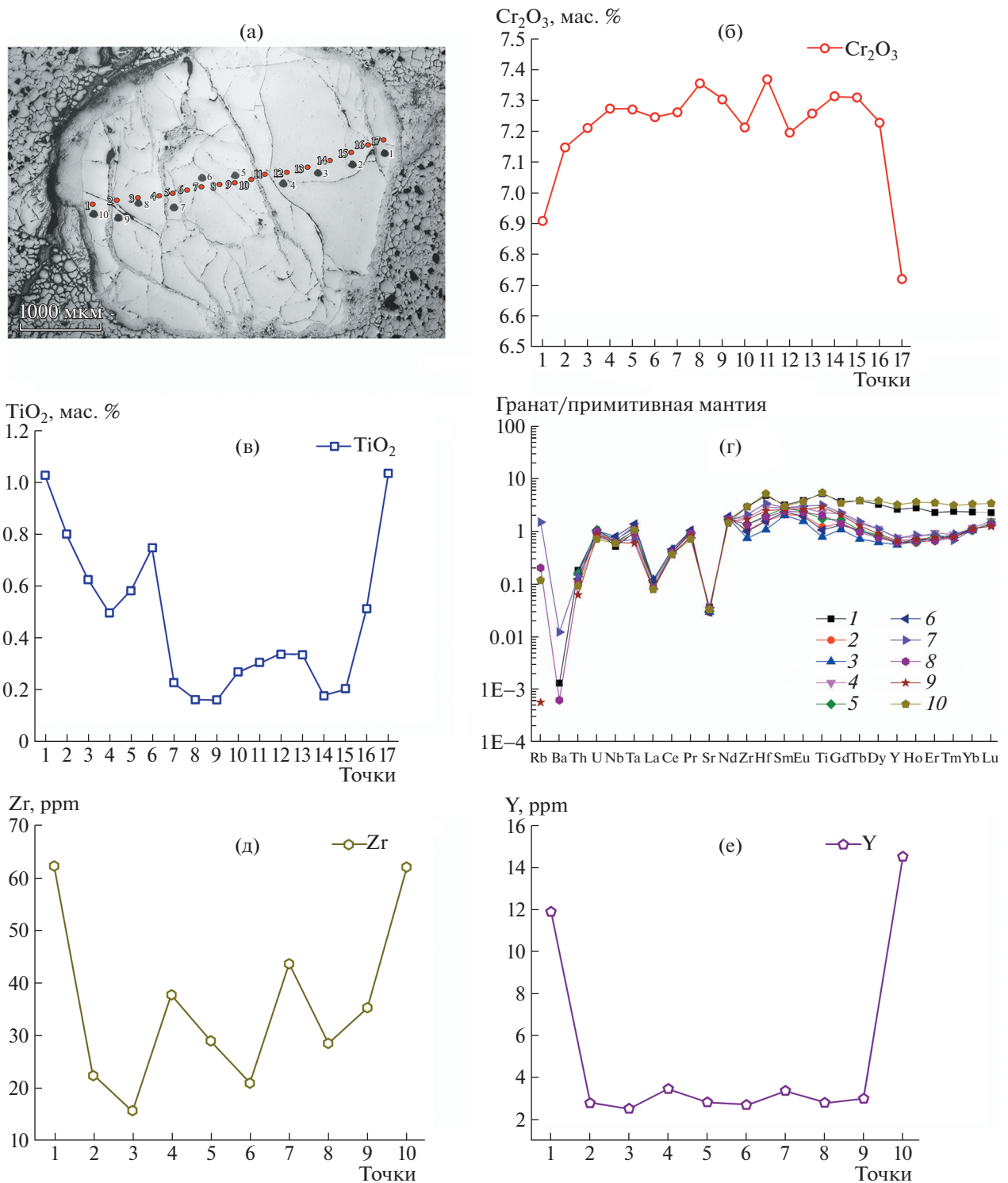


Рис. 3. Распределение главных и редких элементов в зерне граната-2. (а) – зерно граната в отраженном свете с точками определения главных элементов (показаны красными кругами) и точками лазерной абляции, (б) – распределение Cr₂O₃ и (в) – распределение TiO₂; (г) – распределение несовместимых элементов, нормированных на примитивную мантию [17]; (д) – распределение Zr, (е) – распределение Y. Цифры на оси абсцисс на графиках распределения элементов (б, в, д, е) соответствуют номерам точек на рис. За.

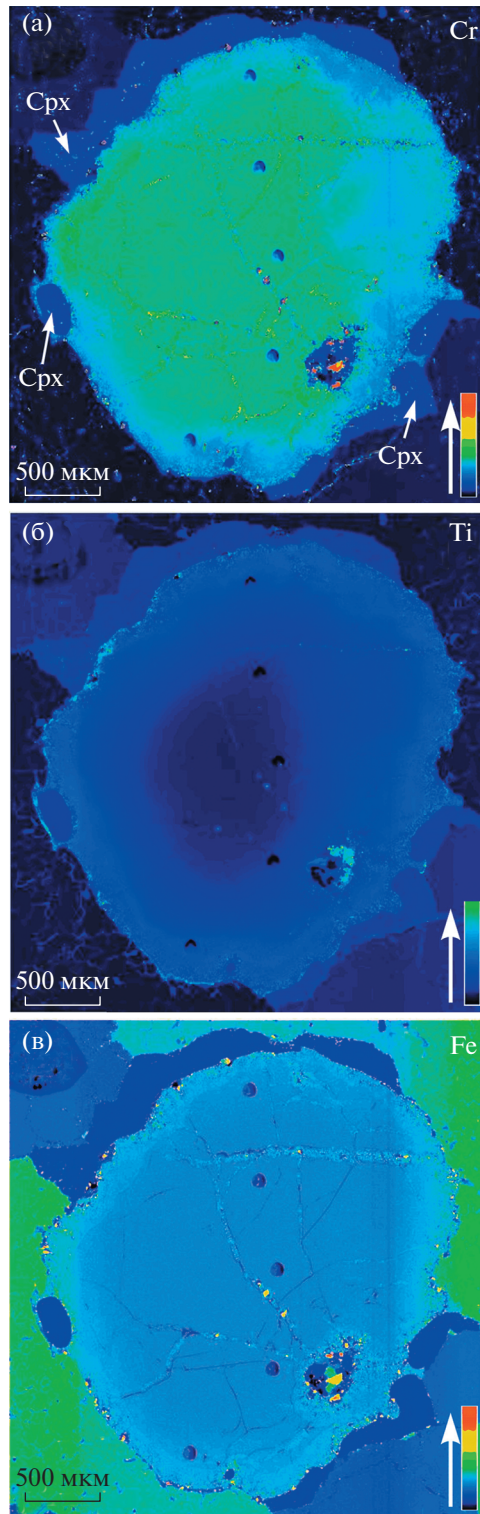


Рис. 4. Карты распределения элементов в гранате 1 (по данным рентгеноспектрального микроанализа). (а) – Cr, (б) – Ti, (в) – Fe.

идальным распределением PЗЭ. По мнению авторов, гранат с синусоидальным распределением PЗЭ, но с составом, отвечающим лерцолитовым

гранатам, образовался при взаимодействии древнего субкальциевого граната с силикатным расплавом. Затем породы подверглись метасоматозу

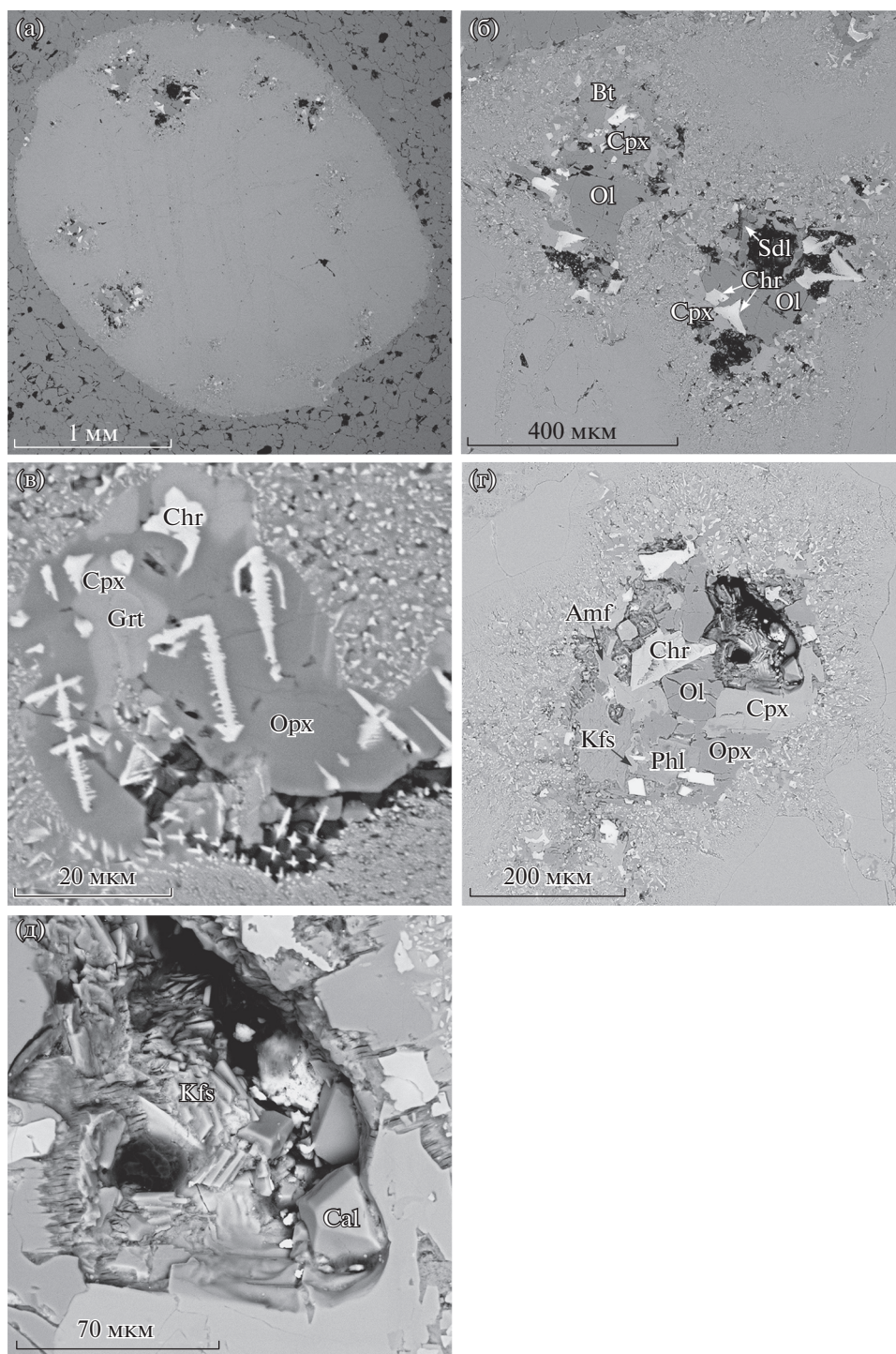


Рис. 5. Растровые изображения в режиме обратно-рассеянных электронов: (а) – зерно граната с полиминеральными включениями; (б) – полиминеральные включения; (в) – дендриты магнезиохромита в полиминеральном включении; (г, д) – полиминеральное включение с полостью, выполненной кристаллами кальцита, калиевого полевого шпата и биотита. Аббревиатуры минералов согласно [18].

астеносферным силикатным расплавом, что привело к обогащению деплетированных перидотитов клинопироксеном и гранатом.

Полученные нами данные позволяют с нескольких позиций рассмотреть процессы модифика-

ции деформированных гранатовых лерцолитов. К наиболее ранней минеральной ассоциации лерцолита могут быть отнесены порфирокласты оливины, ядра граната, демонстрирующие геохимические характеристики гранатов деплетированных

Таблица 1. Представительные анализы минералов (вес. %) из ксенолита деформированного лерцолита Уд 11–04 и полиминеральных включений в гранате

	Орх*1	Орх*2	Орх	Срх	Срх*1	Срх*2	Ol*	Ol	Sod	Phl*	Phl*
SiO ₂	44.9	53.0	57.3	55.2	45.3	43.6	39.0	40.8	37.3	47.6	42.0
TiO ₂	0.87	0.28	0.20	0.36	1.93	2.74				2.42	0.67
Al ₂ O ₃	12.9	4.19	0.60	1.79	11.1	11.5			31.1	7.12	4.97
Cr ₂ O ₃	5.29	1.67	0.25	1.24	3.49	4.40	0.87	0.04		0.34	
FeO	8.25	7.40	5.91	3.36	4.81	4.34	11.8	9.48		7.6	10.2
MnO	0.36	0.54	0.13	0.10	0.43	0.26	0.34	0.12		0.40	
MgO	25.2	30.6	34.0	18.5	14.6	12.7	46.4	49.1		19.5	26.6
CaO	2.29	1.94	0.92	17.1	18.0	19.6	0.35	0.05		2.01	
Na ₂ O			0.18	1.69	0.34	0.43			24.8	0.32	
K ₂ O				0.04						6.07	10.2
NiO							0.03	0.35			
Cl									7.02		
Total	100.0	99.6	99.5	99.3	100.0	99.7	98.7	99.9	100.2	93.4	94.6
Si	1.611	1.870	1.986	1.996	1.667	1.624	0.982	1.000	2.914	3.410	3.113
Ti	0.023	0.007	0.005	0.010	0.053	0.077				0.130	0.037
Al	0.544	0.174	0.025	0.076	0.482	0.506			2.861	0.601	0.434
Cr	0.150	0.047	0.007	0.035	0.102	0.129	0.017	0.001			
Fe ⁺²	0.186	0.187	0.167	0.097	0.095	0.063	0.249	0.194		0.456	0.632
Fe ⁺³	0.061	0.032	0.004	0.005	0	0					
Mn	0.011	0.016	0.004	0.003	0.013	0.008	0.007	0.002		0.024	0.000
Mg	1.345	1.606	1.756	0.995	0.801	0.705	1.743	1.793		2.084	2.937
Ca	0.088	0.073	0.034	0.661	0.710	0.783	0.009	0.001		0.154	0.000
Na			0.012	0.119					3.761	0.044	0.000
K				0.002						0.555	0.960
Ni							0.001	0.007			
Cl									0.930		
SUM	4.019	4.012	4.000	3.999	4.000	3.998	3.008	2.993	10.465	7.459	8.113
Mg#	0.88	0.90	0.91	0.91	0.89	0.92	0.87	0.90		0.82	0.82

* – минералы из полиминеральных включений (по данным ЭДС).

перидотитов (низкие содержания Zr и Y), и, возможно, ортопироксен. Хотя тот факт, что многие зерна ортопироксена не несут следов деформации, может свидетельствовать о его более позднем происхождении.

Центральные части граната отвечают по составу главных элементов гранатам лерцолитового парагенезиса, в то же время для них характерно синусоидальное распределение PЗЭ. Согласно существующим моделям, гранаты лерцолитового парагенезиса с таким распределением могут образоваться при метасоматозе гарцбургитов СНО флюидами [10] или силикатными расплавами [4]. Однако при метасоматозе силикатным расплавом должны увеличиваться содержания Y и Zr, чего не

наблюдается в центральных частях изученных нами гранатов.

Гранаты центральных частей, несмотря на деплетированность в отношении Y и тяжелых PЗЭ, демонстрируют обогащенность легкими редкими землями, Nb, Ta, Th, U относительно граната из примитивного гранатового перидотита [11] (рис. 6 б).

Центральные части гранатов характеризуются суперхондритовыми отношениями Zr/Hf и субхондритовыми Ti/Eu. Эти характеристики предполагают, что центральные части граната с синусоидальным распределением были в равновесии с карбонатитовым расплавом [12, 13].

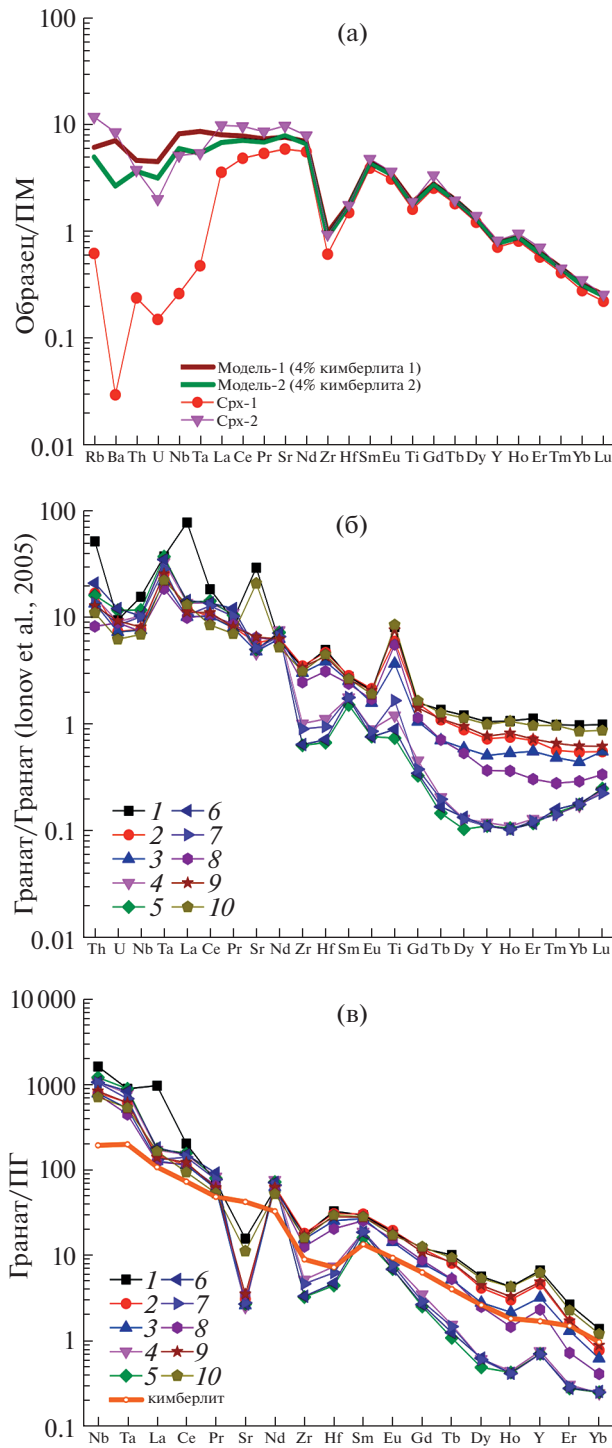


Рис. 6. (а) – распределение несовместимых элементов в областях пироксена без включений (Срх-1) и с большим количеством черных включений (Срх-2). Толстой линией показан состав клинопироксена при добавлении 4% кимберлита (состав кимберлита-1 и кимберлита-2 из работы [6]); (б) – распределение несовместимых элементов в гранате-1, нормированное на гранат из примитивного перидотита [11]; (в) – модельные редкоэлементные составы расплавов, равновесные с разными зонами граната-1. Используются коэффициенты распределения из [15]. Для сравнения показан состав кимберлита из [6].

По мнению Шу и Брея [14], гарцбургитовые гранаты с синусоидальным распределением РЗЭ появляются в результате взаимодействия депле-

тированных гранатовых гарцбургитов с карбонатитовыми расплавами. Проведенные ими расчеты показали, что необходимо небольшое количе-

ство карбонатитового расплава (0.3–3%) для появления синусоидального распределения РЗЭ в ранее деплетированных гранатах.

Если использовать коэффициенты распределения гранат/силикатно-карбонатный расплав, определенные в экспериментах [15], то полученные составы расплавов в равновесии с центральными и краевыми частями гранатов значительно отличаются от редкоэлементного состава кимберлита трубки Удачная (рис. 6 в). По распределению РЗЭ модельные расплавы, равновесные с краевыми частями граната, близки к кимберлиту, но значительно обогащены по сравнению с кимберлитом Nb, Ta и Hf и обеднены Sr. Расплавы, равновесные с центральными частями граната, характеризуются более крутым отрицательным наклоном в области тяжелых и средних РЗЭ, приближаясь к кимберлиту в области легких РЗЭ. Они обогащены Nb, Ta, Zr, Hf и, в большей степени, по сравнению с краевыми частями, обеднены Sr.

Как свидетельствует карта распределения хрома, зерно граната с синусоидальным распределением РЗЭ было резорбировано, а затем на него вырос новый слой. Процесс роста нового слоя граната сопровождался ростом клинопироксена. Об этом свидетельствуют включение клинопироксена в кайме граната и характер границы между гранатом и окружающими его зернами клинопироксена.

Как упоминалось выше, клинопироксены содержат большое количество черных включений по периферии зерен и вдоль залеченных трещин. Результаты моделирования показывают, что микроэлементный состав этих областей клинопироксенов может объясняться добавлением 4% расплава, по составу отвечающего свежему кимберлиту трубки Удачная Восточная [6] (рис. 6а). На основании этого можно сделать вывод, что на заключительных стадиях роста клинопироксена составы просачивающихся расплавов приближались к кимберлитовому расплаву.

На заключительном этапе происходило взаимодействие граната с флюидом и образование зон инконгруэнтного плавления граната. Об этом свидетельствуют полиминеральные включения в гранате, келифитовые каймы и минеральные ассоциации, выполняющие трещины в гранате.

О присутствии флюидной фазы свидетельствуют многочисленные полости, которые наблюдаются как в мелкозернистом агрегате келифитовых кайм, так и в полиминеральных включениях. Минеральная ассоциация, выполняющая полость в полиминеральном включении в гранате-1 (Kfs + Cal + Bt) (рис. 5д), свидетельствует, что плавление граната вызвано поступлением водно-углекислотного флюида с высоким содержанием К.

Фазы, находящиеся в полиминеральных включениях, образовались на стадии выноса при быстрой кристаллизации расплава, о чем свидетельствуют дендриты хромита и вариации в составах пироксенов и слюды, а так же присутствие содалита, фазы устойчивой при низких давлениях [16].

Таким образом, полученные нами данные позволяют выделить четыре стадии в эволюции состава деформированного гранатового лерцолита.

Первая стадия предполагает взаимодействие деплетированного перидотита с расплавом, по составу близким к карбонатитовым расплавам, и образование гранатов с синусоидальным распределением РЗЭ. Сложно определить, с каким процессом связано растворение граната с синусоидальным характером распределения РЗЭ. Этот процесс мог предшествовать или быть связан с метасоматозом силикатным расплавом, близким по составу РЗЭ к кимберлиту, но отличающемся повышенными содержаниями Nb, Ta, Hf. С этим этапом метасоматоза связаны рост краевых частей гранатов и появление клинопироксена.

На заключительном этапе, предшествовавшем выносу ксенолита кимберлитовым расплавом, наблюдались плавление граната, образование полиминеральных включений и келифитовых кайм. Этот этап сопровождался поступлением высококалорийного водно-углекислого флюида, о чем свидетельствуют полиминеральные включения, присутствующие в каймах новообразованного граната.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН и ИГХ СО РАН при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00394).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burgess S.R., Harte B.* // Journal of Petrology. 2004. V. 45. № 3. P. 609–633.
2. *Simon N.S., Carlson R.W., Pearson D.G., et al.* // Journal of Petrology. 2007. V. 48. № 3. P. 589–625.
3. *Shimizu N.* Young Geochemical Features in Cratonic Peridotites from Southern Africa and Siberia / Mantle Petrology: Field Observations and High Pressure Experimentation. Geochem Soc Spec Publ. 1999. V. 6. P. 47–55.
4. *Griffin W.L., Shee S.R., Ryan C.G., et al.* // Contrib. Mineral. Petrol. 1999. V. 134. P. 232–250.
5. *Pearson D.G., Canil D., Shirey S.B.* Mantle Samples Included in Volcanic Rocks: Xenoliths and Diamonds. / In: Carlson, R.W. (Ed.). Treatise on Geochemistry. 2003. V. 2. The Mantle and Core. Elsevier, Amsterdam. P. 171–276.
6. *Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Golovin A.V., et al.* // Lithos. 2012. V. 152. P. 173–186.

7. *Harte B.* // The Journal of Geology. 1977. V. 85. № 3. P. 279–288.
8. *Sobolev N.V., Lavrentev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V.* // Contrib. Mineral. Petrol. 1973. V. 40. № 1. P. 39–52.
9. *Agashev A., Ionov D., Pokhilenko N., et al.* // Lithos. 2013. V. 160. P. 201–215.
10. *Stachel T., Aulbach S., Brey G.P., et al.* // Lithos. 2004. V. 77. P. 1–19.
11. *Ionov D.A., Blichert-Toft J., Weis D.* // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. P. 2399–2418.
12. *Rudnick R.L., McDonough W.F., Chappell B.W.* // Earth Planet. Sci. Lett. 1992. V. 114. P. 463–475.
13. *Yaxley G.M., Crawford A.J., Green D.H.* // Earth Planet. Sci. Lett. 1991. V. 107. P. 305–317.
14. *Shu Q., Brey G.P.* // Earth Planet. Sci. Lett. 2015. V. 418. P. 27–39.
15. *Girnis A., Bulatov V.K., Brey G.P., et al.* // Lithos. 2013. V. 160–161. P. 183–200.
16. *Schneider J.B., Jenkins D.M.* // The Canadian Mineralogist. 2020. V. 58. P. 3–18.
17. *McDonough W.F., Sun S.S.* // Chem. Geol. 1995. V. 120. № 3–4. P. 223–253.
18. *Whitney D.L., Evans B.W.* // Amer. Mineral. 2010. V. 95. P. 185–187.

THE NATURE OF HETEROGENEITY OF HIGH-CHROMIUM GARNETS IN XENOLITE OF DEFORMED LHERZOLITE FROM UDACHNAYA KIMBERLITE PIPE (YAKUTIA)

Academician of the RAS **V. S. Shatsky^{a, b, c, #}**, **A. L. Ragozin^{a, b}**, and **E. S. Sitnikova^{a, b}**

^a*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

^b*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

^c*A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: shatsky@igm.nsc.ru*

Significant variations in the composition of garnets, both within individual grains and in the rock as a whole, are found in the xenolith of deformed garnet lherzolite from the Udachnaya kimberlite pipe. The central parts of the grains, corresponding in composition to the garnets of the lherzolite paragenesis, demonstrate a sinusoidal distribution of rare earth elements (REE). At the same time, the rims have a distribution typical of megacrystals of garnets from kimberlites. Despite being depleted with respect to Y and heavy REE, the cores are enriched in light rare earths, Nb, Ta, Th, U, relative to garnet from primitive garnet peridotite. According to the REE distribution, the model melts in equilibrium with the rims of garnet are close to kimberlite, but are significantly enriched in comparison with kimberlite in Nb, Ta, and Hf and depleted in Sr. Melts in equilibrium with the central parts of garnet are characterized by a steeper negative slope in the region of heavy and medium REE, approaching kimberlite in the region of light REE. The data obtained make it possible to distinguish several stages in the evolution of deformed garnet lherzolite. The first stage involves the interaction of depleted peridotite with a melt similar in composition to carbonatite melts. This stage is associated with the formation of garnet with a sinusoidal REE distribution. At the next stage, which was preceded by the dissolution of garnet grains, garnet rims with an increased content of Ti, Zr, and Y were formed, and clinopyroxene appeared. At the final stage, garnet melted, caused by the inflow of a water-carbon dioxide fluid with a high potassium content, which led to the formation of polymineral inclusions and kelyphite rims.

Keywords: upper mantle, peridotite, mantle metasomatism