

Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых

УДК 552.31.5+552.321.6(571.56)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ИЗ КСЕНОЛИТОВ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК «ОБНАЖЕННАЯ» И «УДАЧНАЯ»

© Т.В. Калашникова¹, Л.В. Соловьева², С.И. Костровицкий³

^{1,3}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

²Институт Земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

В данной работе сравнивается состав минералов ксенолитов из двух кимберлитовых трубок («Обнаженная» и «Удачная»), которые расположены в различных частях Якутской кимберлитовой провинции. Приведены новые данные по модальному минеральному составу пород, химическому и редкоэлементному составу граната и клинопироксена, а также выполнены оценки *P-T*-условий формирования пород. В трубке «Обнаженная» была выделена группа пород (Sp, Sp-Grt, Grt лерцолиты и оливиновые вебстериты), которые характеризуются средне- и крупнозернистой структурой и по модальному минеральному составу формируют единый ряд с постепенным увеличением содержания граната и клинопироксена. В пироксенитах наблюдаются мегакристаллические разновидности, в некоторых отмечены метасоматические изменения в виде замещения пироксенов мелкозернистым агрегатом амфибола и флогопита.

Изученная нами группа пород из трубки «Обнаженная» оказалась близка по распределению редких элементов в гранате и клинопироксене к высокотемпературным деформированным Grt лерцолитам из трубки «Удачная». Однако перидотиты из трубки «Обнаженная» отличаются крупнозернистой структурой, более магнизальным составом всех минералов, а также более высокими содержаниями Al_2O_3 и Cr_2O_3 в пироксенах, более низкими содержаниями Cr_2O_3 и TiO_2 в гранате. Кроме того, определенные параметры формирования минералов из ксенолитов трубки «Обнаженная» лежат в области стабильности графита ($T = 535-764^\circ C$; $P = 12,8-27,4$ кбар), тогда как для деформированных лерцолитов из трубки «Удачная» *P-T*-параметры очень высоки и находятся в области стабильности алмаза ($T = 1150-1350^\circ C$; $P = 47-65$ кбар). Одновременно исследованная группа ксенолитов из трубки «Обнаженная» отличается по составу минералов и от крупнозернистых Grt лерцолитов из трубки «Удачная», для которых предполагается реститовое происхождение. Вероятно, указанная группа ксенолитов из трубки «Обнаженная» и деформированные лерцолиты из трубки «Удачная» сформировались из близкого по составу мантийного источника.

Ключевые слова: литосферная мантия; Сибирский кратон; перидотит; гранат; клинопироксен.

COMPARATIVE CHARACTERISTIC OF THE COMPOSITION OF XENOLITH-DERIVED MINERALS OF “OBNAZHENNAYA” AND “UDACHNAYA” KIMBERLITE PIPES

T.V. Kalashnikova, L.V. Solovieva, S.I. Kostrovitsky

Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, 1a Favorsky St., Irkutsk, 664033, Russia.

Institute of the Earth Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

¹Калашникова Татьяна Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории геохимии основного и ультраосновного магматизма, тел.: (3952) 511457, e-mail: Kalashnikova@igc.irk.ru

Kalashnikova Tatiana, Junior Researcher of Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, tel.: (3952) 511457, e-mail: Kalashnikova@igc.irk.ru

²Соловьева Лидия Васильевна, старший научный сотрудник лаборатории геологии и магматизма древних платформ, тел.: (3952) 425434, e-mail: Solv777@crust.irk.ru

Solovieva Lidia, Senior Researcher of the Laboratory of Geology and Magmatism of Ancient Platforms, tel.: (3952) 425434, e-mail: Solv777@crust.irk.ru

³Костровицкий Сергей Иванович, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии основного и ультраосновного магматизма, тел.: (3952) 511457, e-mail: Serkost@igc.irk.ru

Kostrovitsky Sergey, Leading Researcher of Laboratory of Geochemistry of Basic and Ultrabasic Magmatism, tel.: (3952) 511457, e-mail: Serkost@igc.irk.ru

The mineral composition of xenoliths from “Obnazhennaya” and “Udachnaya” kimberlite pipes located in the different parts of the Yakutian kimberlite province is compared in the article. A new data on modal mineral composition of rocks, chemical and rare earth element distribution in garnet, clinopyroxene and P - T -conditions of rock formation are discussed. A group of medium- and coarse-grained Sp, Sp-Grt, Grt lherzolites and olivine websterites that form a united series with gradually increasing garnet and clinopyroxene modal content has been distinguished in the “Obnazhennaya” pipe. Megacrystalline varieties are observed in pyroxenites where metasomatic alterations occur in the form of pyroxene substitution with amphibole and phlogopite fine-grained aggregate.

By the distribution of rare earth elements in garnet and clinopyroxene the investigated group of rocks from the “Obnazhennaya” pipe is found to be close to high-temperature deformed Grt-lherzolites from the “Udachnaya” pipe. However, peridotites from the “Obnazhennaya” pipe are characterized with coarse-grained structure, higher magnesia content in all minerals; increased content of Al_2O_3 and Cr_2O_3 in pyroxenes and lower contents of Cr_2O_3 and TiO_2 in garnet. Moreover, some mineral formation parameters from the “Obnazhennaya” pipe xenoliths range within the graphite stability area ($T = 535$ – $764^\circ C$; $P = 12,8$ – $27,4$ kbar), while P - T -estimations for “Udachnaya” pipe deformed lherzolites are very high and range within the diamond stability area ($T = 1150$ – $1350^\circ C$; $P = 47$ – 65 kbar). The simultaneously studied group of xenoliths from the “Obnazhennaya” pipe differs in mineral composition from the coarse-grained lherzolites from the “Udachnaya” pipe which are supposed to be of restite origin. It is assumed that the xenoliths from the “Obnazhennaya” pipe and deformed lherzolites from the “Udachnaya” pipe were formed from the mantle sources of similar composition.

Keywords: lithospheric mantle; Siberian craton; peridotites; garnet; clinopyroxene.

Введение

Ксенолиты из кимберлитовых трубок являются уникальным источником информации о составе и строении литосферной мантии. По петрографическим особенностям, минеральному и химическому составу, изотопным данным возможно установить характеристики процессов, влиявших на формирование данных пород. Предполагается, что литосферная мантия под древними кратонами представлена преимущественно ультраосновным деплетированным веществом, которое впоследствии испытало различные процессы метасоматизма и метаморфизма. Однако природа данных процессов и состав первичного протолита остаются дискуссионными.

В настоящем исследовании рассматриваются ксенолиты перидотитов и пироксенитов из кимберлитовой трубки «Обнаженная», которые представляют вещество литосферной мантии под северо-восточной частью Сибирского кратона. Приведены новые данные по модальному минеральному составу пород, химическому и редкоэлементному составу граната и клинопироксена, а также выполнены оценки P - T -условий формирования пород. Возраст кимберлитов трубки «Обнаженная» оценивается как позднеюрский – раннемеловой (156–171 млн лет) [13].

Мантийные ксенолиты из данной трубки разделяются нами на несколько групп. В первую группу был отнесен ряд пород от Sp, Sp-Grt, Grt лерцолитов и Sp, Sp-Grt, Grt оливиновых вебстеритов до Sp, Sp-Grt, Grt вебстеритов. По петрографическим наблюдениям данная группа составляет более 50% от общего объема ксенолитов, в ней наблюдаются непрерывные переходы с постепенным увеличением содержания клинопироксена и граната. Эта группа пород была условно названа нами магнезиальной. Вторая группа – гранатовые мегакристаллические клинопироксениты и эклогиты, которые существенно отличаются по составу минералов. Третью группу составляют флогопит-ильменитсодержащие породы, которые характеризуются железистым составом минералов и также значительно отличаются по петрографическим характеристикам и определениям возраста. В данной статье две последние группы и вопрос их генезиса не рассматриваются.

Для сопоставления приводятся литературные данные по хорошо изученным мантийным ксенолитам из кимберлитовой трубки «Удачная». Данная трубка относится к верхнедевонскому кимберлитовому циклу (360–370 млн лет) [4] и расположена в центральной части Сибирского кратона. Ксенолиты из этой

* Sp – шпинелевые; Sp-Grt – шпинель-гранатовые; Grt – гранатовые.

трубки изучались большим числом исследователей [1–3, 5, 8, 10 и др.].

Методы исследования

Для характеристики пород из трубки «Обнаженная» было использовано 30 образцов сравнительно свежих ксенолитов, отражающих спектр пород от Sp-Grt и Grt лерцолитов до оливинных вебстеритов и вебстеритов. Ксенолиты из кимберлитовой трубки «Обнаженная» были детально исследованы в шлифах на поляризационном микроскопе Olympus BX51. Изучение химического состава минералов проводилось на рентгеновском электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8200 в ИГХ СО РАН (аналитик – Л.Ф. Суворова). Для восьми представительных образцов (табл. 1) были получены концентрации редких элементов в минералах методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на микроанализаторе Cameca IMS 4f Ion probe в ярославском филиале Физико-технического института РАН (г. Ярославль, аналитик – С.Г. Симакин).

Петрографическое описание

Модальный минеральный состав магнезиальной группы ксенолитов из трубок «Обнаженная» и «Удачная» приведен на рис. 1. В трубке «Обнаженная», как упоминалось выше, выделяется ряд пород с постепенным увеличением содержания пироксенов, а также граната (до 30% и более). Перидотиты из трубки характеризуются средне- и крупнозернистой структурой. Оливин в перидотитах трубки «Обнаженная» образует крупные

зерна (до 2–5 мм), разбитые трещинами на блоки, иногда корродированные серпентином, а также небольшие округлые выделения (до 0,7 мм), как правило, окруженные кальцитовой оторочкой и серпентином. Ортопироксен образует зерна до 2–5 мм. В нем часто наблюдаются тонкие (0,01–0,03 мм) пластинки распада клинопироксена. Шпинель чаще наблюдается в перидотитах, в виде структур распада пироксена (рис 2, а), иногда в виде включений в гранате (рис 2, б).

В пироксенитах и вебстеритах обычно заметны деформированные мегакристаллы (2–8 см) пироксенов с параллельными пластинчатыми структурами распада пироксенов ± шпинели ± граната (рис. 2, в), окруженные перекристаллизованной мелко-среднезернистой матрицей из тех же минералов. Гранат отмечается преимущественно в пироксенитах, в виде крупных выделений, иногда в сростании с сульфидами, а также в виде структур распада в клинопироксене (рис. 2, в, г). Формирование структур распада указывает на длительное постепенное охлаждение первоначальных мегакристаллов пироксена. В некоторых породах данной серии отмечаются флогопит-амфиболовые прожилки, развивающиеся по пироксену, что свидетельствует о проявлении мантийного метасоматизма [6]. Вторичные изменения, связанные с воздействием кимберлитового расплава и с поздними низкотемпературными процессами, выразились преимущественно в серпентинизации и карбонатизации.

Таблица 1

Петрологические характеристики представительных образцов магнезиальной серии из кимберлитовой трубки «Обнаженная»

Номер образца	Название породы	Содержание минералов, об. %						Вторичные изменения	T, °C	P, кбар
		Ol	Opх	Срх	Grt	Sp	Sulph			
74-891	Grt лерцолит	45	25	12	18	-	Е.з.	Carb, Serp, Phl ~5–10%	764	27,4
7-341	Sp-Grt лерцолит	30	24	20	23	1-3		Carb, Serp ~3–5%	741	16,8
7-259	Grt Ol вебстерит	15	25	30	30	-	≤0,5	Carb, Serp, Рудный ~5–7%	660	14,0
7-421	Sp-Grt Ol вебстерит	8	22	22	45	3	Е.з.	Serp, рудный ~10%	543	14,6
7-294	Grt Ol вебстерит	10	30	30	30	-	0,5–1	Serp, хлорит, Phl, Prv рудный ~10%	535	14,6
7-255	Grt вебстерит	-	29	40	30	-	~1,5	Serp, рудный ~3–5%	673	22,6
74-968	Grt вебстерит	-	10	54	35	-	~1	Serp, рудный ~3–5%	682	23,6
06-288	Мегакристаллический Grt-Срх ортопироксенит	-	64	17	19	-	~0,5	Serp, Carb, Prv(?) ~7–10%	572	12,8

Примечание. Е.з. – единичные зерна; T – температура по [15]; P – давление по [11].

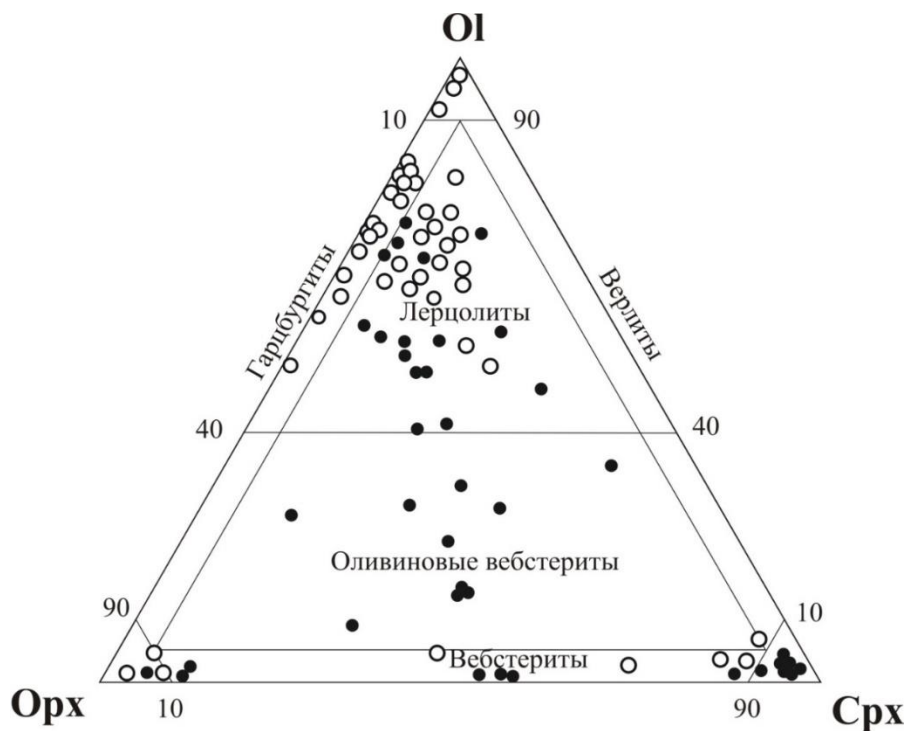


Рис. 1. Модальный минеральный состав ксенолитов из кимберлитовых трубок «Обнаженная» (черные значки) и «Удачная» (белые значки) (содержание оливина и пироксенов рассчитано на 100%).
 Данные по трубке «Обнаженная» – подсчет нашей коллекции, по трубке «Удачная» – Л.В. Соловьевой [10]

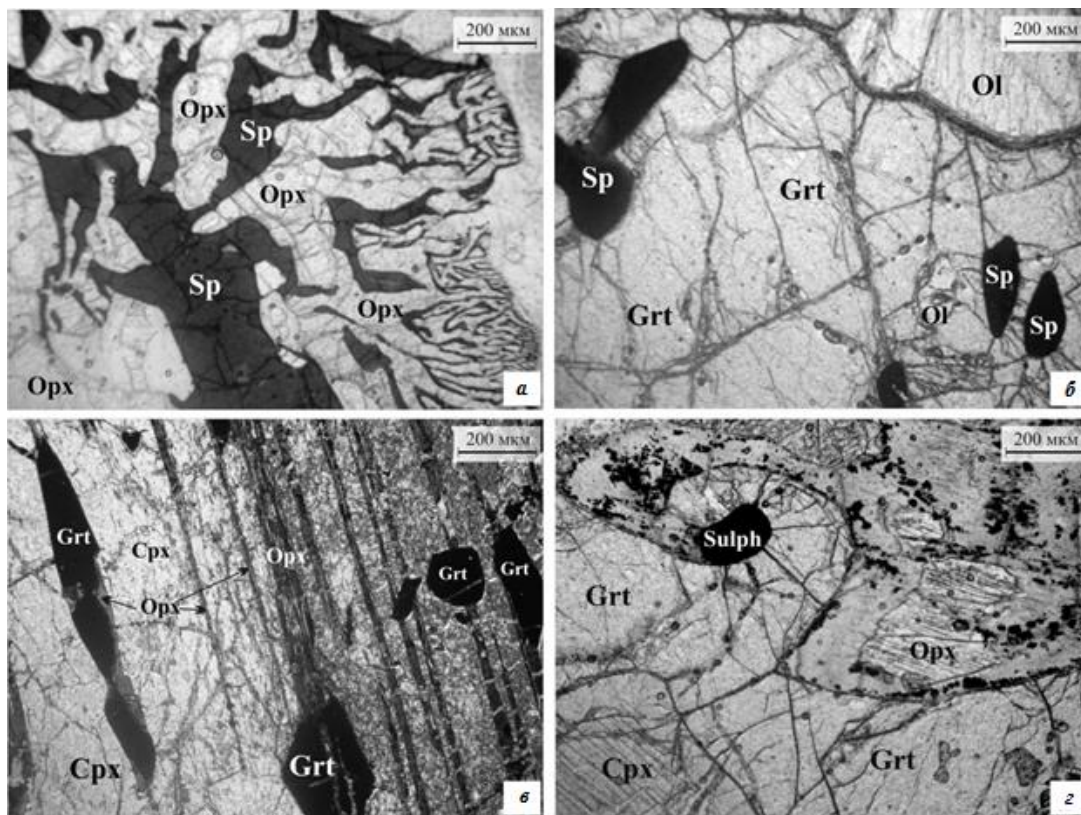


Рис. 2. Взаимоотношения шпинели, граната и других породообразующих минералов. Увеличение 4^x:
 а – симплектитовые срastания шпинели и ортопироксена (обр. 06-218 – Sp лерцолит); б – реликты замещения шпинели в гранате (обр. 7-341 – Sp-Grt лерцолит); в – гранат и ортопироксен в структурах распада мегакристалла клинопироксена (обр. 7-345 – Grt клинопироксенит – вебстерит); г – гранат в срastании с сульфидом (обр. 7-294 – Grt оливиновый вебстерит)

В трубке «Удачная» выделяются две главные группы ультраосновных ксенолитов мантийного вещества: низкотемпературные (термин ввел Ф.Р. Бойд) крупнозернистые (granular, coarse-grained) Sp, Sp-Grt, Grt перидотиты (гарцбургиты, лерцолиты) и высокотемпературные деформированные (sheared, deformed) Grt перидотиты (гарцбургиты, лерцолиты). Деформированные перидотиты составляют около 60% от всех ксенолитов в трубке «Удачная» [6], характеризуются порфиорокластами граната, пироксенов и мелкозернистой оливиновой матрицей, что свидетельствует о перекристаллизации в условиях высокого давления. Данный тип пород отсутствует в трубке «Обнаженная». Крупнозернистые Sp- Grt и Grt перидотиты из трубки «Удачная» составляют около 25% ксенолитов с крупными размерами зерен, отсутствием признаков деформации и отвечают по составу гарцбургитам и лерцолитам, сильно обедненным гранатом и клинопироксеном. Между крупнозернистыми и деформированными лерцолитами существуют переходные разновидности,

причем ряд исследователей предполагает, что степень деформации не изменяет химический состав минералов [10, 14]. Пироксенитовые парагенезисы пород в трубке «Удачная» распространены значительно меньше и не образуют переходов к перидотитам [2]. В табл. 1 приведены модальный минеральный состав и оценка *P-T*-условий формирования 8 представительных образцов магнезиальной лерцолит-вебстеритовой серии из трубки «Обнаженная».

Химический состав минералов

Химические анализы минералов из изученных ксенолитов трубки «Обнаженная» приведены в табл. 2. Сопоставление химического состава минералов по содержанию петрогенных оксидов и Mg# в ксенолитах из двух трубок произведено по нашим и литературным данным. Литературные данные по химическому составу минералов из трубки «Удачная» заимствованы из работ: по зернистым лерцолитам – [2, 5, 8]; по деформированным лерцолитам – [1, 10, 14]. Литературные данные по трубке «Обнаженная» взяты из работы [14].

Таблица 2

Химические составы минералов в представительных образцах магнезиальной серии из кимберлитовой трубки «Обнаженная»

Образец	74-891				7-341					7-259		
	Grt лерцолит				Sp-Grt лерцолит					Grt Ol вебстерит		
Минерал	Ol	Opх	Срх	Grt	Ol	Opх	Срх	Grt	Sp	Opх	Срх	Grt
SiO ₂	41,56	57,89	54,89	42,24	40,91	55,78	53,73	42,94	0,37	56,81	54,95	43,05
TiO ₂	<0,05	0,10	0,29	0,14	<0,05	0,10	0,39	0,06	0,24	0,06	0,42	< 0,05
Al ₂ O ₃	<0,05	1,00	4,03	21,46	<0,05	2,37	4,30	22,07	37,85	1,78	7,24	23,49
Cr ₂ O ₃	<0,05	0,29	1,66	2,82	<0,05	0,72	1,99	2,15	30,29	0,17	0,59	0,40
FeO	7,53	5,01	1,44	7,91	7,36	5,07	1,50	7,74	12,17	5,04	1,93	7,79
MnO	0,06	0,10	0,04	0,41	0,07	0,09	0,06	0,32	0,09	0,08	0,05	0,24
MgO	50,93	35,81	14,82	19,74	51,28	35,25	15,22	20,94	18,02	35,15	13,13	21,81
CaO	<0,05	0,26	20,36	5,06	<0,05	0,40	19,61	4,76	<0,05	0,21	17,05	3,74
Na ₂ O	<0,05	0,07	2,35	<0,05	<0,05	0,07	2,69	0,05	0,54	0,06	4,35	<0,05
K ₂ O	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	0,09	<0,05	<0,05	<0,05
NiO	0,32	0,08	<0,05	<0,05	<0,05	0,10	0,13	<0,05	<0,05	0,14	<0,05	<0,05
Сумма	100,40	100,62	99,89	99,80	100,09	99,97	99,72	101,05	99,98	99,51	99,76	100,67
Mg#	92,4	92,7	94,8	81,7	92,6	92,5	94,8	82,8	72,5	92,6	92,4	83,3
Cr#		16,1	21,6	8,1		17,0	23,7	6,1	34,9	5,92	5,2	1,1
Ca#		0,5	49,2	15,3		0,8	47,6	13,8		0,4	47,8	10,8

Образец	7-421					7-294				7-255		
Порода	Sp-Grt Ol вебстерит					Grt Ol вебстерит				Grt вебстерит		
Минерал	Ol	Opх	Срх	Grt	Sp	Ol	Opх	Срх	Grt	Opх	Срх	Grt
SiO ₂	41,16	58,29	53,79	42,53	< 0,05	41,06	57,86	54,79	42,13	57,01	54,74	42,86
TiO ₂	<0,05	0,09	0,62	<0,05	0,20	<0,05	0,08	0,76	0,06	0,11	0,71	0,10
Al ₂ O ₃	<0,05	1,06	4,48	21,73	42,77	<0,05	0,97	6,05	22,05	0,92	6,64	23,28
Cr ₂ O ₃	<0,05	0,32	1,86	2,42	25,69	<0,05	0,18	1,21	0,95	0,09	0,43	0,41
FeO	6,62	5,00	1,46	7,79	11,13	6,95	4,75	1,75	8,26	5,83	2,21	9,46
MnO	0,06	0,13	0,07	0,37	0,11	0,07	0,06	0,02	0,26	0,09	0,04	0,29
MgO	53,43	35,97	14,97	20,97	19,66	51,43	35,53	13,48	21,38	36,04	13,88	21,12
CaO	<0,05	0,16	20,23	4,88	<0,05	<0,05	0,21	18,21	3,63	0,21	17,95	3,93
Na ₂ O	<0,05	0,08	2,80	0,08	<0,05	<0,05	<0,05	3,99	0,83	<0,05	3,92	0,07
K ₂ O	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,09	<0,05	<0,05	<0,05	0,16	<0,05	<0,05	<0,05
NiO	<0,05	<0,05	0,08	0,11	<0,05	0,20	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,11
Сумма	101,79	101,26	100,44	100,95	99,95	100,26	99,78	100,32	99,99	100,43	100,56	101,67
Mg#	93,5	92,8	94,8	82,8	75,9	92,9	93,0	93,2	82,2	91,7	91,8	79,9
Cr#		16,6	21,8	7,0	28,7		10,8	11,8	2,8	6,4	4,2	1,2
Ca#		0,3	48,8	14,0			0,4	48,8	10,7	0,4	47,7	11,6

Образец	74-968		06-288		
Порода	Grt вебстерит		Grt-Срх ортопироксенит		
Минерал	Срх	Grt	Opх	Срх	Grt
SiO ₂	55,92	41,91	57,44	55,09	42,55
TiO ₂	0,17	0,08	0,07	0,70	0,07
Al ₂ O ₃	8,46	23,25	1,34	5,87	22,23
Cr ₂ O ₃	0,20	0,19	0,32	1,86	1,89
FeO	2,72	13,71	5,20	1,98	8,56
MnO	0,03	0,29	0,05	0,05	0,29
MgO	11,76	18,36	35,30	12,95	20,76
CaO	15,34	3,47	0,20	17,87	4,19
Na ₂ O	5,31	0,04	0,12	4,12	0,06
K ₂ O	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
NiO	<0,05	<0,05	0,15	<0,05	<0,05
Сумма	99,97	101,35	100,21	100,52	100,65
Mg#	88,5	70,5	92,4	92,1	81,2
Cr#	1,6	0,5	13,8	17,5	5,4
Ca#	47,9	11,8	0,4	49,3	12,5

Примечание. Mg# = Mg/(Mg+Fe)_{ат} · 100%; Cr# = Cr/(Cr+Al)_{ат} · 100%; Ca# = Ca/(Ca+Mg)_{ат} · 100%.

Оливины из Grt, Sp-Grt лерцолитов магнезиальной серии из трубки «Обнаженная» характеризуются относительно узкими вариациями состава с величиной Mg# = 91,2–93,5 и содержанием NiO = 0,38–0,44 мас. %, что согласуется с литературными данными (Mg# = 91,6–93,6; NiO = 0,31–0,44 мас. %). Среди образцов из трубки «Обнаженная» более высокие значения Mg# при близких концентрациях NiO отмечаются для оливиновых

вебстеритов и вебстеритов по сравнению с лерцолитами (см. табл. 2). Оливины из ксенолитов трубки «Обнаженная» близки по химизму оливинам из зернистых лерцолитов трубки «Удачная» (Mg# = 91,7–93,7; NiO = 0,35–0,41 мас. %) и более магнезиальны, чем оливины в деформированных лерцолитах (Mg# = 86,6–92,5; NiO = 0,35–0,42 мас. %).

Ортопироксены из пород разной литологии в магнезиальной серии

трубки «Обнаженная» достаточно близки по химическому составу (см. табл. 2). Магнезиальность ортопироксенов ($Mg\# = 90,7-93,0$) близка к сосуществующими с ними оливинам, что совместно с петрографическими наблюдениями подтверждает их совместную кристаллизацию.

Ортопироксены из Grt, Sp-Grt лерцолитов содержат несколько более высокие концентрации Al_2O_3 , Cr_2O_3 и близки по магнезиальности к вебстеритам и пироксенитам (см. табл. 2). По сравнению с ортопироксенами из зернистых Grt, Sp-Grt перидотитов из трубки «Удачная» оливиновые вебстериты и лерцолиты из трубки «Обнаженная» при сопоставимых магнезиальности и содержанию TiO_2 , Cr_2O_3 , CaO содержат существенно больше Al_2O_3 . В ортопироксенах из деформированных лерцолитов трубки «Удачная» отмечаются существенно меньшие магнезиальность, содержания оксидов Al, Cr и более высокие содержания TiO_2 и CaO.

Клинопироксены из Grt, Sp-Grt лерцолитов пород трубки «Обнаженная» характеризуются относительно высокими содержаниями Cr_2O_3 , более низкими концентрациями TiO_2 и Na_2O , чем вебстериты (см. табл. 2). По сравнению клинопироксеном из зернистых и деформированных лерцолитов из трубки «Удачная» они отличаются существенно более высокими содержаниями Na_2O (зернистые – 0,55–2,28, деформированные – 1,1–1,8 мас. %), Al_2O_3 (зернистые – 0,91–2,96, деформированные – 1,1–1,34 мас. %) и являются более магнезиальными (зернистые – 91,6–95,8, деформированные – 87,8–92,1).

Гранаты из парагенезисов магнезиальной серии из трубки «Обнаженная» последовательно меняют свой состав в сторону уменьшения содержания Cr_2O_3 , CaO и величины $Mg\#$ от Grt, Sp-Grt лерцолитов к Grt вебстеритам (см. табл. 2). На рис. 3 точки граната из Grt, Sp-Grt лерцолитов, оливиновых вебстеритов и частично Grt вебстеритов совпадают с положением гранатов из лерцолитов

этой трубки по данным [14]. Гранаты из трубки «Обнаженная» находятся на диаграмме Соболева в области лерцолитового парагенезиса. Группа зернистых Grt, Sp-Grt лерцолитов из трубки «Удачная» располагается на графике в области более высоких содержаний CaO и Cr_2O_3 . Деформированные лерцолиты в поле лерцолитового парагенезиса образуют более широкий спектр составов (см. рис. 3). Grt-Sp и Grt лерцолиты из трубки «Обнаженная» по содержанию TiO_2 (0,02–0,2 мас. %) и значению $Mg\#$ (80,7–84,1) близки к Grt, Sp-Grt зернистым лерцолитам трубки «Удачная» ($TiO_2 = 0,02-0,14$ мас. %; $Mg\# = 79,9-83,9$) и являются менее хромистыми («Обнаженная»: $Cr_2O_3 = 0,95-3,7$ мас. %; «Удачная»: $Cr_2O_3 = 3,1-11,3$ мас. %). Деформированные лерцолиты из трубки «Удачная» по сравнению с Grt-Sp и Grt лерцолитами трубки «Обнаженная» отличаются более высокими содержаниями TiO_2 (0,1–1,42 мас. %) и низкими значениями магнезиальности (76,8–84,5).

Геохимические особенности граната и клинопироксена

В табл. 3 приведено содержание несовместимых редких элементов в гранате и клинопироксене из исследованных ксенолитов магнезиальной серии трубки «Обнаженная». На рис. 4 приведены спайдердиаграммы содержания редких элементов, нормированного к хондриту C1 [9]. В целом кривые распределения для разных литологических типов пород магнезиальной серии из трубки «Обнаженная» подобны по форме и характеризуются узким диапазоном вариаций нормированных концентраций. Для гранатов отмечаются максимум по Nb, незначительный максимум по Zr и Hf, а также минимумы по Ti и Sr. Распределение редкоземельных элементов в целом соответствует коэффициентам распределения элементов гранат – базальтовый расплав с постепенным увеличением от La к Yb, Lu – так называемое нормальное распределение [1, 12, 14].

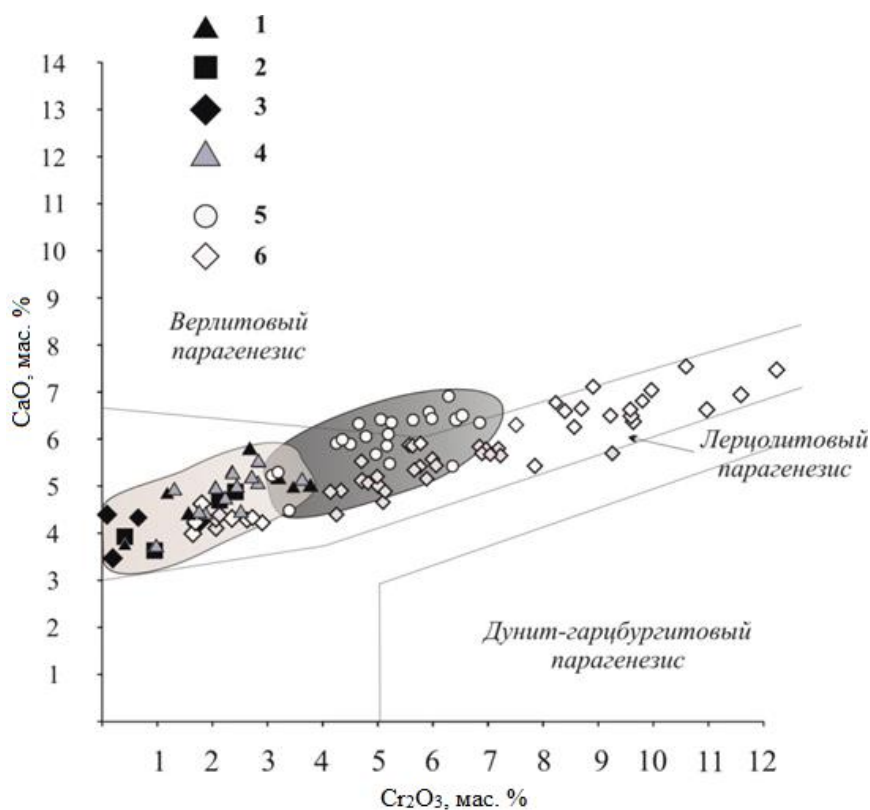


Рис. 3. Диаграмма содержаний Cr_2O_3 -CaO в гранатах.

Трубка «Обнаженная»: 1 – лерцолиты; 2 – оливиновые вебстериты; 3 – вебстериты; 4 – литературные данные – гранатые лерцолиты [14].

Трубка «Удачная»: 5 – зернистые лерцолиты [5, 8]; 6 – деформированные лерцолиты [1, 8, 10, 14].

Светло-серое поле: Sp-Grt и Grt лерцолиты – вебстериты из трубки «Обнаженная».

Темно-серое поле: зернистые Grt лерцолиты из трубки «Удачная»

Таблица 3

Концентрации редких элементов в гранатах и клинопироксенах из пород магнезиальной серии трубки «Обнаженная»

Элемент	74-891		7-341		7-259		7-421		7-294	
	Grt	Cpx	Grt	Cpx	Grt	Cpx	Grt	Cpx	Grt	Cpx
Rb	7,71	2,09	6,10	2,10	6,31	2,73	7,55	2,04	8,28	2,06
Ba	0,07	0,13	0,03	0,34	0,10	0,15	0,12	0,14	1,21	0,23
Nb	0,18	0,59	0,14	0,59	0,04	0,44	0,25	0,55	0,18	0,61
La	0,00	1,64	0,00	1,82	0,00	2,33	0,08	2,09	0,01	1,95
Ce	0,02	5,20	0,01	8,89	0,03	10,75	0,16	7,81	0,05	9,32
Sr	0,31	103,37	0,07	142,12	0,43	595,53	0,17	137,84	0,27	144,20
Nd	0,24	6,40	0,44	10,98	0,53	13,72	0,41	9,08	0,43	11,84
Zr	16,52	18,01	12,18	19,21	22,41	34,64	19,58	18,61	10,74	21,33
Hf	1,01	0,69	0,95	0,79	1,10	0,90	0,93	0,72	0,91	0,98
Sm	0,55	2,09	0,80	3,49	0,98	4,62	0,78	2,85	0,79	3,71
Eu	0,32	0,60	0,43	1,00	0,67	1,63	0,43	0,75	0,40	0,96
Ti	843,18	2296,70	584,01	2779,70	633,55	3039,11	638,29	3090,87	607,22	2935,58
Gd	1,63	2,06	2,26	2,41	2,31	3,38	1,99	1,73	1,87	2,70
Dy	2,91	0,82	3,38	1,05	3,85	1,42	3,31	0,89	3,15	1,23
Y	20,90	2,63	23,16	2,75	27,16	3,99	21,16	2,94	22,09	3,57
Er	2,81	0,23	2,98	0,23	3,58	0,38	2,71	0,32	2,76	0,26
Yb	2,74	0,06	3,41	0,12	3,96	0,17	3,05	0,20	3,27	0,19

Элемент	7-255		74-968		06-288	
	Grt	Cpx	Grt	Cpx	Grt	Cpx
Rb	10,93	2,67	13,87	4,94	8,56	2,76
Ba	11,26	0,85	0,10	0,25	0,20	2,89
Nb		0,12	0,02	0,04	0,12	0,51
La	0,01	2,57	0,01	0,88	0,01	1,55
Ce	0,07	14,29	0,02	2,78	0,07	13,92
Sr	0,43	285,43	0,31	96,46	0,31	279,23
Nd	0,64	23,42	0,20	2,90	0,60	24,33
Zr	27,72	38,35	9,80	11,39	12,44	34,20
Hf	2,30	1,53	1,03	0,47	0,83	2,18
Sm	1,54	8,27	0,49	1,17	1,10	6,28
Eu	0,82	2,24	0,34	0,40	0,60	1,63
Ti	776,54	3800,11	926,15	1131,04	565,42	3663,47
Gd	4,34	6,18	1,55	1,28	2,28	3,40
Dy	8,12	2,98	3,80	0,83	2,47	0,85
Y	52,80	9,24	33,94	3,47	14,07	1,11
Er	7,48	0,82	4,13	0,33	1,70	0,14
Yb	7,18	0,55	4,55	0,09	1,82	

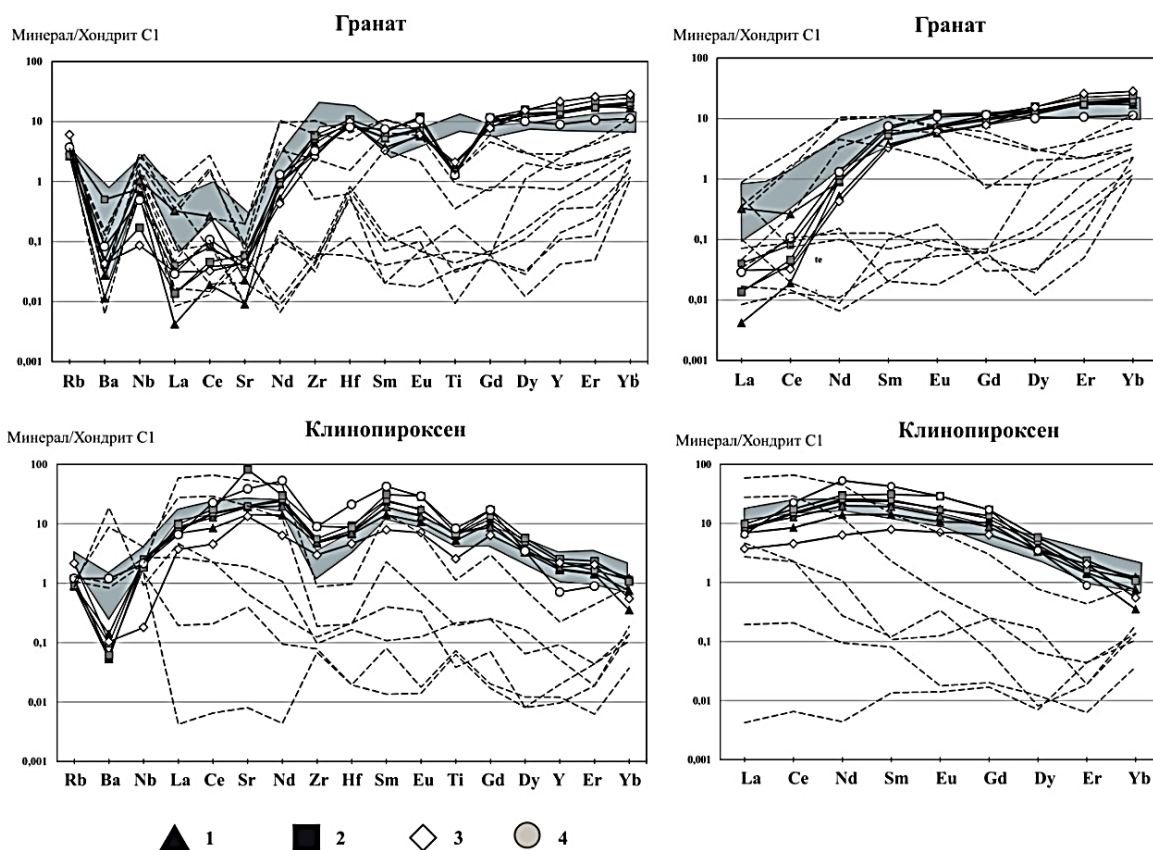


Рис. 4. Содержание редких и редкоземельных элементов в гранате и клинопироксене из ксенолитов в трубках «Обнаженная» и «Удачная», нормированное к хондриту C1 [9]:
 1 – Sp – Grt, Grt лерцолиты (обр. 74-891, 7-341); 2 – Sp-Grt, Grt оливниновые вебстериты (обр. 7-294, 7-259, 7-421); 3 – Grt вебстерит (обр. 74-968); 4 – Grt ортопироксенит (обр. 06-288).

Серое поле – содержание редких элементов в гранате и клинопироксене из деформированных перидотитов трубки «Удачная» с нормальным распределением РЗЭ в гранате [1, 10].

Пунктирные линии – состав граната и клинопироксена из зернистых лерцолитов трубки «Удачная» [5]

Распределение редких элементов в гранатах из деформированных лерцолитов трубки «Удачная» (серое поле) в целом подобно распределению в выделенной серии из трубки «Обнаженная» за исключением максимума по Ti. Также следует отметить несколько более высокие концентрации элементов группы HFSE и LREE, и более низкие – HREE. Гранаты из Sp-Grt, Grt зернистых лерцолитов трубки «Удачная» (пунктирные линии) демонстрируют широкие вариации значений и более низкие концентрации и по форме кривых значительно отличаются от гранатов из трубки «Обнаженная» и из деформированных перидотитов трубки «Удачная». Часть гранатов из зернистых перидотитов показывают так называемую синусоидальную форму кривых для REE (пониженные концентрации Gd-Er), что обычно объясняется метасоматическим воздействием [10]. На кривых распределения клинопироксена для выделенной серии из трубки «Обнаженная» наблюдаются небольшой максимум по Sr+Nd, а также минимумы Zr+Hf, Ti.

Поле для клинопироксенов из деформированных лерцолитов также в целом совпадает с клинопироксенами из трубки «Обнаженная» (см. рис. 4). Crх из пород трубки «Обнаженная» имеют несколько более высокие концентрации MREE (Nd, Sm, Eu). Кривые распределения редких элементов для клинопироксенов из зернистых лерцолитов трубки «Удачная» демонстрируют широкий разброс значений от очень низких нормированных содержаний до сопоставимых значений для Crх из пород трубки «Обнаженная» и деформированных перидотитов из трубки «Удачная».

Расчет *P-T*-условий кристаллизации

Для представительных образцов из трубки «Обнаженная» был проведен расчет *P-T*-условий кристаллизации, результаты которого представлены на рис. 5. Для расчетов использовались 2-Рх термометр Taylor [15] и Опх-Grt барометр Nickel, Green [11], которые были

приняты для ксенолитов из трубки «Обнаженная» в работе [14]. Породы серии лерцолит-вебстерит из трубки «Обнаженная» демонстрируют относительно низкие *P-T*-параметры: $T = 535\text{--}764^\circ\text{C}$; $P = 12,8\text{--}27,4$ кбар (см. табл. 1). Литературные оценки *P-T*-параметров кристаллизации для гранатовых лерцолитов из трубки «Обнаженная» [14] в целом близки к нашим данным: $T = 620\text{--}731^\circ\text{C}$; $P = 13,5\text{--}25,2$ кбар (см. рис. 5). При этом все образцы из трубки «Обнаженная» находятся в области устойчивости графита. Рассчитанные значения для зернистых лерцолитов из трубки «Удачная» имеют большой диапазон значений ($T = 640\text{--}1150^\circ\text{C}$; $P = 23\text{--}55$ кбар), при этом они частично располагаются в области устойчивости алмаза [5, 8]. Наиболее высокие *P-T*-параметры показывают деформированные лерцолиты из трубки «Удачная» [1, 10, 14], при этом большая часть точек лежит выше расчетной геотермы 40 mW/m^2 .

Обсуждение результатов

При рассмотрении группы пород гранатовых и гранат-шпинелевых лерцолит-вебстеритов из трубки «Обнаженная» было показано, что они образуют непрерывный ряд по модальному минеральному составу с постепенным увеличением содержания граната и клинопироксена.

На основании петрографических характеристик можно сделать вывод, что изученные лерцолиты представляют собой группу пород со следующей последовательностью образования минералов: оливин – ортопироксен – клинопироксен, что в целом соответствует последовательности магматической кристаллизационной дифференциации, причем породы формировались как в гранатовой, так и в шпинелевой зоне. Наличие выделений сульфидов в виде глобулей, давленных капель, их взаимоотношения с гранатом и пироксеном свидетельствует о ликвации сульфидной жидкости при достаточно высокой температуре. Некоторая часть пород затем была изменена метасоматическими процессами, о чем

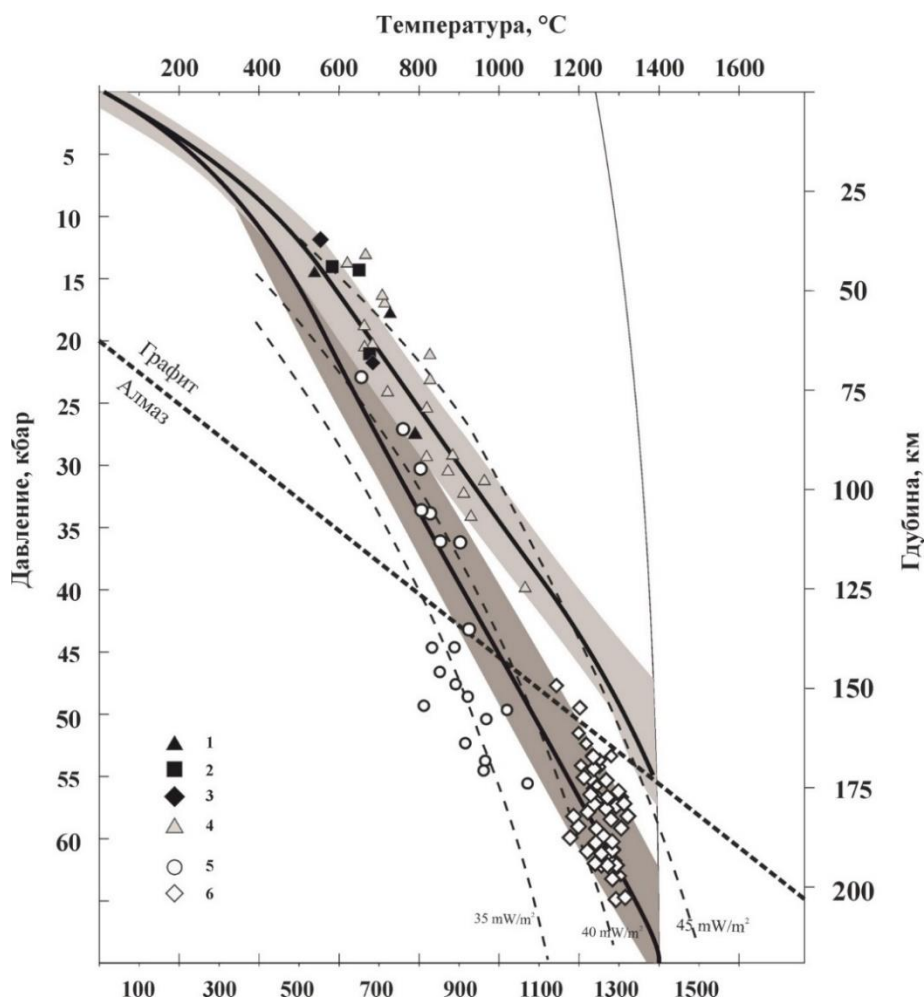


Рис. 5. *P-T*-значения для ксенолитов из трубок «Удачная» и «Обнаженная».

Трубка «Обнаженная»: 1 – лерцолиты; 2 – оливиновые вебстериты; 3 – вебстериты; 4 – гранатовые лерцолиты по [14].

Трубка «Удачная»: 5 – зернистые лерцолиты – рассчитано по данным [5, 8]; 6 – деформированные лерцолиты – рассчитано по данным [1, 8, 10, 14].

Толстая сплошная линия сверху – геотерма для трубки «Обнаженная»; толстая сплошная линия внизу – геотерма для трубки «Удачная». Линии геотерм и поля – по [14]

свидетельствует развитие флогопита и амфибола по пироксену, а также в виде секущих прожилков.

Выделенная группа ультраосновных парагенезисов из трубки «Обнаженная» значительно отличается по химическому и минералогическому составу от аналогичных пород из трубки «Удачная» – крупнозернистых и деформированных лерцолитов.

При сравнении наших образцов с зернистыми лерцолитами из трубки «Удачная» можно отметить следующие особенности: оливин, ортопироксен и гранат Grt, Sp-Grt лерцолитов магнезиальной серии из трубки «Обнаженная» близки по значению Mg# и содержанию

TiO₂ (Orx, Grt) к соответствующим минералам из зернистых перидотитов трубки «Удачная». Однако образцы из трубки «Обнаженная» резко отличаются более высокими концентрациями и формой распределения несовместимых редких элементов и более низкими *P-T*-параметрами кристаллизации минералов.

При сравнении Grt, Sp-Grt лерцолитов – оливиновых вебстеритов из трубки «Обнаженная» с деформированными перидотитами также отмечаются сходства и различия. Деформированные высокотемпературные перидотиты из трубки «Удачная» подобны нашим образцам из трубки «Обнаженная» как по содержанию, так и по форме распределения

несовместимых редких элементов (за исключением минимума по Ti для перидотитов из трубки «Обнаженная») (см. рис. 4). Нормальное распределение редкоземельных элементов в гранатах согласуется с предположением о равновесии тех и других пород с расплавами. С другой стороны, есть и существенные геохимические различия между гранатом и клинопироксеном из этих двух типов пород. Например, для всех минералов из трубки «Обнаженная» отмечаются более высокие значения Mg#, хотя оценки *P-T*-параметров кристаллизации позволяют относить формирование деформированных ксенолитов к глубинам 150–200 км (зона стабильности алмаза).

Для мантийных ксенолитов из трубки «Удачная» большинство исследователей применяют традиционную гипотезу первичного реститового протолита как остатка от высокой степени плавления примитивной мантии и его последующей модификации под влиянием мантийных метасоматических процессов [7, 10, 12, 14]. Предполагается, что зернистые лерцолиты из трубки «Удачная» представляют собой протолит мантийной литосферы в центре Сибирского кратона, возникший как гарцбургитовый остаток при 38%-м полибарическом плавлении в интервале давлений от 7 до 4 ГПа. [7]. Затем произошло метасоматическое преобразование гарцбургитового протолита вследствие воздействия на него силикатных и богатых карбонатом расплавов незадолго до развития кимберлитового магматизма. Дж. Ховарт с соавторами [14] предложили 4-стадийную схему метасоматического преобразования вещества мантийной литосферы Сибирского кратона, которое связывается с воздействием плюма (с 360 до 160 млн лет). Два первых этапа проявлены в ксенолитах из трубки «Удачная». Данные авторы предполагают, что с началом подъема плюма проявился метасоматизм (при 950–1100°C), который привел к рефертилизации реститовых лерцолитов и гарцбургитов. Его воздействие отразилось в увеличе-

нии содержания CaO в гранатах и модалного содержания клинопироксена. Второй стадией авторы считают дотрапповый высокотемпературный (<1200°C) кимберлитовый метасоматизм, связанный с расплавами от низких степеней парциального плавления литосферной мантии. Данный метасоматизм отразился в изменении состава гранатов (уменьшении содержания CaO-Cr₂O₃ и изменении содержания REE – обогащение LREE).

Окончательные стадии метасоматизма, связанного с воздействием плюма, Дж. Ховарт с соавторами [14] рассматривают на материале перидотитов из кимберлитовой трубки «Обнаженная». По мнению данных авторов, одновременно с излиянием Сибирских плато-базальтов (250 млн лет) происходил интенсивный метасоматизм с образованием крупнозернистых лерцолитов с высоким содержанием незонального граната и клинопироксена, а также отслаивание нижней части литосферы (приблизительно 50–70 км) в районе Куойкского кимберлитового поля. Последняя стадия отвечает затуханию активности плюма (170–160 млн лет) и действию кимберлитовых флюидов. В контексте модели Дж. Ховарта и соавторов [14] наиболее убедительным является влияние расплавов плюмового происхождения в низах мантийной литосферы Сибирского кратона на формирование деформированных и частично деформированных перидотитов из трубки «Удачная» [1]. Данные по вещественному составу пород и минералов зернистых перидотитов из трубки «Удачная» в целом не противоречат гипотезе их происхождения как остатков от высокой степени плавления первичной мантии, в дальнейшем переработанной метасоматическими процессами [7, 14].

Химический состав минералов из ксенолитов трубки «Обнаженная» отличается и от деформированных, и от зернистых лерцолитов из трубки «Удачная», это не позволяет нам предположить, что изученная группа пород

имеет реститовое происхождение. Однако по распределению редких элементов в минералах наши ксенолиты близки к деформированным ксенолитам. Возможно, это свидетельствует о происхождении из единого источника.

Выводы

По петрографическим особенностям, модальному минеральному составу, химизму минералов и геохимическим особенностям граната и клинопироксена породы магнезиальной серии из кимберлитовой трубки «Обнаженная» (Куойкское поле, северо-восток Сибирского кратона) показывают непрерывные переходы от лерцолитовых к пироксенитовым парагенезисам.

Сопоставление химизма минералов и геохимии граната и клинопироксена из Sp-Grt, Grt лерцолитов и оливиновых вебстеритов из магнезиальной группы ксенолитов в трубке «Обнаженная» с соответствующими характеристиками ксенолитов перидотитовых серий из трубки «Удачная» показывает существенные различия в составе главных минералов из ксенолитов обеих трубок. По *P-T*-характеристикам породы магнезиальной перидотит-пироксенитовой серии из трубки «Обнаженная» располагаются на геотерме значительно выше зернистых и деформированных перидотитов из трубки «Удачная».

Распределение несовместимых редких элементов в гранате и клинопироксене из Sp-Grt, Grt лерцолитов и оливиновых вебстеритов из магнезиальной серии трубки «Обнаженная» за некоторыми отличиями сходно с распределением в этих минералах из высокотемпературных деформированных лерцолитов из трубки «Удачная» с нормальным распределением РЗЭ в гранате.

Библиографический список

1. Генетическая связь деформированных перидотитов и мегакристов граната из кимберлитов с астеносферными расплавами / Л.В. Соловьева, Ю.Г. Лаврентьев, К.Н. Егоров [и др.] //

Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 4. С. 281–301.

2. Кимберлиты и кимберлитоподобные породы: вещество верхней мантии под древними платформами / Л.В. Соловьева, Б.М. Владимиров, Л.В. Днепровская [и др.]. Новосибирск: Наука, 1994. 256 с.

3. О происхождении мегакристов граната из кимберлитов / С.И. Костровицкий, Н.В. Алымова, Д.А. Яковлев, Л.В. Соловьева, М.А. Горнова // Доклады Академии наук. 2008. Т. 420. № 2. С. 225–230.

4. Определение U-Pb возрастов перовскитов из якутских кимберлитов ионно-ионным масс-спектрометрическим (SHRIMP) методом / П.Д. Кинни, Б.Дж. Гриффин, Л.М. Хеамен, Ф.Ф. Брахфогель, З.В. Специус // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 1. С. 91–99.

5. Соловьева Л.В. Проработка мантийной литосферы Сибирского кратона восстановленными флюидами в среднепалеозойском кимберлитовом цикле – геохимические следствия // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412. № 6. С. 804–809.

6. Уханов А.В., Рябчиков И.Д., Харьков А.Д. Литосферная мантия Якутской кимберлитовой провинции. М.: Наука, 1988. 286 с.

7. Doucet L.S., Ionov D.A., Golovin A.V. The origin of coarse garnet peridotites in cratonic lithosphere: new data on xenoliths from the Udachnaya kimberlite, Central Siberia // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2013. V. 165. P. 1225–1242.

8. Ionov D.A., Doucet L. S., Ashchepkov I.V. Composition of the lithospheric mantle in the Siberian Craton: new constraints from fresh peridotites in the Udachnaya-East Kimberlite // Journal of petrology. 2010. V. 51. I. 2. P. 2177–2210.

9. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223–253.

10. Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock

and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya / A.M. Agashev, D.A. Ionov, N.P. Pokhilenko, A.V. Golovin, Yu. Cherepanova, I.S. Sharygin // *Lithos*. 2013. V. 160–161. P. 201–215.

11. Nickel K.G., Green D.H. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds // *Earth Planetary Science Letters*. 1985. V. 73. P. 158–170.

12. Plume impingement on the Siberian SCLM: Evidence from Re-Os isotope systematics / J.F. Pernet-Fisher, G.H. Howarth, D.G. Pearson [et al] // *Lithos*. 2015. V. 218–219. P. 141–154.

13. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from in situ U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope

analysis / Sun Jing, Liu Chuan-Zhou, S. Tappe, S. Kostrovitsky, Fu-Yuan Wu, D. Yakovlev // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. V. 404. P. 283–295.

14. Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths / G.H. Howarth, P.H. Barry, J.F. Pernet – Fisher, I.P. Baziotis, N.P. Pokhilenko, L. N. Pokhilenko, R.J. Bodnar, L.A Taylor., A.M. Agashev // *Lithos*. 2014. V. 184–187. P. 209–224.

15. Taylor W.R. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the thermobarometry of fertile lherzolite and garnet webstertite // *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*. 1998. V. 172. P. 381–408.

Статья поступила 25.11.2015 г.