———— ГЕОХИМИЯ —

УДК 552.11

КСЕНОЛИТЫ ВЫСОКОГЛИНОЗЁМИСТЫХ ПИРОКСЕНИТОВ ИЗ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ БАЗАЛЬТОВ О. ШПИЦБЕРГЕН — СВИДЕТЕЛЬСТВО ДЕЛАМИНАЦИИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

М. Ю. Корешкова^{1,*}, член-корреспондент РАН Ю. Б. Марин², Л. П. Никитина³, Х. Даунс⁴, А. Токушева¹, А. Г. Гончаров¹

Поступило 29.10.2018 г.

Рассмотрено происхождение шпинель-гранатовых пироксенитов из ксенолитов в четвертичных базальтоидах о. Шпицберген (арх. Свальбард). Породы имеют высокое содержание Al_2O_3 , MgO и низкое Cr. Первичная магматическая ассоциация Spl–Opx–Cpx и высокое содержание Al в пироксенах указывают на образование пород как кумулятов водосодержащих базальтовых расплавов в нижней коре при давлении порядка 1,2 ГПа. Преобразование структуры от магматической гипидиоморфнозернистой до метаморфической гранобластической и рост граната за счёт шпинели и высокоглинозёмистых пироксенов свидетельствуют о перемещении на глубину ниже границы фазового перехода шпинель—гранат в системе CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂, не содержащей Cr₂O₃. Параметры равновесия Grt–Opx-accoциации составляют 1060–1120 °C, 2,2–2,6 ГПа. Таким образом, магматические пироксениты были перемещены на большую глубину в мантию, что свидетельствует о деламинации в регионе нижней континентальной коры, со-державшей ультрамафические кумуляты.

Ключевые слова: пироксены, гранат, шпинель, деламинация континентальной коры.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0869-56524855604-608

Мантийные пироксениты привлекают внимание исследователей в связи с проблемой деламинации континентальной коры [1] и их участием в образовании базальтовых расплавов [2]. В нашей работе представлены результаты исследования ксенолитов высокоглинозёмистых пироксенитов из эруптивных брекчий щелочных базальтоидов вулканов Сигурд, Сверре о. Шпицберген (арх. Свальбард), расположенных в области развития протерозойских пород, переработанных во время каледонской орогении [3]. Ранее [4, 5] были опубликованы данные для пироксенитов широкого спектра составов из тех же брекчий и выдвинуто предположение, что это продукты плавления мантийных перидотитов. Однако особенности структуры и состава высокоглинозёмистых пироксенитов и их минералов требуют специального рассмотрения проблемы их происхождения. Среди этой группы пироксенитов установлены шпинелевые и шпинель-гранатовые клинопироксениты, шпинель-гранатовые вебстериты и вебстериты, включая плагиоклазовый вебстерит (табл. 1).

Санкт-Петербургского государственного университета

² Национальный минерально-сырьевой

Модальное содержание породообразующих минералов в них, полученное с помощью программы анализа изображений "ImageScope", показано там же. В качестве акцессорных в породах присутствуют ильменит, апатит, циркон, сульфиды. Пироксениты имеют структуры от магматической гипидиоморфнозернистой до метаморфической гранобластической. Образцы SP34, SP20, SP12, сохранившие гипидиоморфнозернистую структуру, характеризуются отсутствием или незначительным количеством граната. В пироксенитах с гранобластовой структурой гранат образует каймы вокруг шпинели. Во всех ксенолитах наблюдаются участки плавления.

Химический состав пород (табл. 2) определён методами XRF (главные элементы), ICP MS (REE) во ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург). Состав ксенолитов SP12, SP33 рассчитан исходя из состава, плотности и модальных количеств минералов. Пироксениты обладают высоким содержанием CaO, Al₂O₃, MgO и низким содержанием Cr. Концентрация REE в 5–15 раз выше хондритовой, и отсутствует Euаномалия.

Состав минералов определён в Birkbeck University of London: главные элементы — на микрозонде JEOL 8100 Superprobe, редкие — локальным методом на масс-спектрометре Agilent 7500а с лазерной абляцией. Пироксены высокоглинозёмистые (табл. 1), образуют слабо зональные зёрна с ламелями распада

¹ Институт наук о Земле

университет "Горный", Санкт-Петербург

³ Институт геологии и геохронологии докембрия

Российской Академии наук, Санкт-Петербург

⁴Birkbeck University of London

^{*}E-mail: m.koreshkova@spbu.ru

		Шпинеле- вый клино- пироксе- нит	Шпинель-гранатовые клинопироксениты				Шпинелеь-гранатовые вебстериты				Веб- стерит	Плагио- клазовый вебстерит
		SP12	SP3	SP6	SP15	SP33p	SP33w	SP34	SP24	SP1	SP5	SP20
Модальный состав												
Opx		-	_	_	_	_	29	27	25	18	11	62
Срх		74	63	22	60	65	50	52	60	57	39	27
Amph		-	12	49		14	10	12	11	9	36	6
Spl		6	5	6	10	5	4	4	_	-	-	_
Grt		_	16	1	10	13	6	2	2	16	-	_
Pl		_	_	_	_	-	_	_	_	_	_	5
Участки плавления		20	4	22	20	3	1	3	2	_	14	_
Основные характеристики состава пироксенов												
Срх	Al_2O_3	8,91	10,4	7,72		8,98	6,81	8,73 (8,44)	8,05	8,04	8,21	8,74 (8,46)
	Na ₂ O	1,46	1,54	1,54		1,57	1,45	1,41 (1,28)	1,57	1,86	1,78	1,70 (1,54)
	Mg#	0,754	0,756	0,698		0,776	0,791	0,748 (0,750)	0,761	0,740	0,734	0,817 (0,818)
Opx	Al_2O_3	_	_	—		-	4,30	4,92 (5,17)	4,57	4,41	5,42	5,64 (5,89)
	Mg#	-	_	—		-	0,781	0,763 (0,763)	0,767	0,740	0,750	0,817 (0,817)
Р-, Т-параметры равновесия минеральных ассоциаций												
Т	Opx–Cpx [6]	-	_	—		-	1150	1150		860		1000
Т	Grt–Cpx [8]	_	1330			1110	1070	1150	1150	1110	-	_
Т	Grt–Opx [4]	-	—			-	1100	1120	1110	1060	-	_
Р	Grt–Opx [4]	-	_	_		-	2,6	2,5	2,5	2,2	_	_

Таблица 1. Модальный состав (об.%), характеристики состава пироксенов (мас.%) и оценки температуры (*T*, °C) и давления (*P*, ГПа) для ксенолитов пироксенитов из четвертичных базальтов о. Шпицберген

Примечание. В скобках состав пироксенов, рассчитанный с учётом ламелей распада. Mg# — магнезиальность $(Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+}))$ в ат. ед.). Amph — амфибол, Grt — гранат, Cpx — клинопироксен, Opx — ортопироксен, Pl — плагиоклаз, Spl — шпинель. Курсивом выделены значения *T*, полученные при *P* = 2,4 ГПа.

твёрдого раствора, составляющими до 10% объёма зерна. Срх в основной массе представлен Na-Alавгитом и диопсидом. Рисунок 1 указывает на более высокое содержание Al_2O_3 и низкое Na_2O в их исходном составе. Рассчитанный с учётом ламелей состав Срх из ксенолитов SP34, SP20 отвечает Alавгиту и отличается меньшим содержанием Na₂O. Срх в каймах, обрамляющих карманы плавления, имеет состав Ti-Al-авгита. В основной массе Срх содержит LREE, MREE на уровне 15 хондритовых величин и обеднён HREE. Состав Орх с учётом ламелей также обогащён Al₂O₃. Amph представлен керсутитом (до 5,4 мас.% TiO₂). Андезин (An₃₈) в обр. SP20 образует агрегаты полигональных зёрен. В карманах плавления лейсты представлены битовнитом (An₆₇₋₇₇). Spl обладает низким содержанием Cr_2O_3 (0,1-0,6 мас.%) и Mg# = 0,39-0,60. Grt незональный, содержит 4,8-6,4 мас.% СаО и имеет Мg# в пределах 0,55-0,66. Ильменит из SP34 содержит 6,6 мас.% MgO.

Для первичной Cpx—Opx-ассоциации в вебстеритах значения температуры, полученные по составам центральных частей зёрен минералов с использова-



Рис. 1. Содержание Al, Na в ксенолитах высокоглинозёмистых пироксенитов: 1 - SP1, 2 - SP3, 3 - SP5, 4 - SP24, 5 - SP34, 6 - SP20, 7 - SP33w, 8 - SP33p, 9 - SP12. Стрелка указывает изменение состава пироксенов при метаморфизме. 10-13 – состав Срх из водосодержащих базальтовых расплавов в экспериментах при различных давлениях, ГПа: 1,2 [9], 1,3 [10], 2,0 [2], 3,0 [12].

КОРЕШКОВА и др.

Таблица 2. Химический состав ксенолитов высокоглинозёмистых пироксенитов из четвертичных базальтов о. Шпицберген

	Spl-клино- пироксенит		SI	pl—Grt-пи	проксенит	ГЫ	Spl—Grt-вебстериты				Вебсте- рит	РІ-веб- стерит
	SP12	SP12*	SP3	SP6	SP15	SP33p*	SP33w*	SP34	SP24	SP1	SP5	SP20
Главные элементы, мас.%												
SiO ₂	41,31	46,11	41,71	38,20	40,99	44,59	47,79	45,77	47,74	44,88	43,15	49,92
TiO ₂	1,16	1,16	1,04	1,77	1,15	1,17	0,89	2,03	1,16	1,21	2,06	0,42
Al_2O_3	14,85	12,42	17,96	16,74	15,93	14,97	10,56	9,88	7,88	12,52	11,11	6,61
FeO	11,86	8,63	12,00	13,27	10,69	9,06	10,23	10,38	10,58	12,65	11,64	11,17
MnO	0,15	0,08	0,18	0,20	0,14	0,13	0,15	0,14	0,16	0,19	0,15	0,17
MgO	14,23	13,04	14,19	12,52	14,27	13,16	17,82	15,66	15,09	14,38	12,61	24,99
CaO	12,69	17,15	10,79	10,42	13,14	14,91	11,08	13,38	15,06	11,21	12,17	4,92
Na ₂ O	1,30	1,36	1,04	2,02	1,32	1,40	1,03	1,47	1,45	1,27	2,41	0,60
K ₂ O	0,22	0,00	0,19	0,79	0,21	0,12	0,06	0,27	0,10	0,17	1,02	0,08
Cr ₂ O ₃		0,01				0,07	0,06					
P_2O_5	0,051		<0,05	0,25	0,05			<0,05	<0,05	<0,05	0,24	<0,05
LOI	0,96		<0,10	2,22	1,05			<0,10	<0,10	0,25	2,16	<0,10
Mg#	0,681	0,729	0,678	0,627	0,704	0,721	0,756	0,729	0,718	0,669	0,659	0,799
Редкие элементы, г/т												
Cr	90,2		109	375	56,2	144	159	728	869	533	711	1470
Ni	123		182	311	122	262	225	355	398	317	315	707
Rb	3,43		2,53	15,7	5,21	2,12	1,44	2,78	<2	<2	18,5	<2
Sr	119		75	397	127	90,0	64,7	134	93,3	73,2	435	32,7
Zr	39,1		48,9	112	39,3	35,7	23,1	38	44,9	43,9	99,9	26,5
Hf	1,32		1,42	2,85	1,36	1,27	0,939	1,42	1,65	1,36	2,63	0,72
Nb	4,07		2,97	24,9	3,87	2,29	1,47	4,17	1,55	2,27	28,2	1,16
Y	12,8		21,9	21,5	13,1	10,1	5,71	12,2	14,8	20,6	17,2	4,10
La	5,39		3,1	19,7	4,63	2,65	1,95	4,06	2,76	2,93	20,7	1,48
Ce	10,5		7,03	36,1	9,55	7,10	5,08	9,07	7,71	6,68	37,4	3,54
Nd	6,45		5,17	17,7	6,42	5,85	4,28	7,24	7,31	5,43	18,3	2,64
Sm	2,06		2,02	4,11	1,95	2,10	1,58	2,4	2,55	1,90	4,01	0,85
Eu	0,86		0,94	1,51	0,85	0,824	0,592	0,95	1,04	0,83	1,51	0,28
Gd	2,77		3,52	4,86	2,88	2,53	1,79	3,14	3,42	2,97	4,74	0,99
Er	1,18		2,09	2,05	1,20	0,941	0,483	1,16	1,38	2,10	1,57	0,40
Yb	0,85		1,64	1,60	0,92	0,638	0,339	0,81	1,00	1,68	1,18	0,34
Lu	0,14		0,22	0,25	0,12	0,084	0,044	0,10	0,14	0,25	0,16	0,051
Th	0,42		0,32	2,33	0,67	0,198	0,145	0,41	0,13	0,24	2,37	0,17
U	0,12		<0,1	0,58	0,16	0,058	0,046	<0,1	<0,1	<0,1	0,61	<0,1

Примечание. * Состав, рассчитанный исходя из модального состава, состава минералов и их плотности.

нием модифицированного версидвупироксенового термометра [4], находятся в пределах 1150–860 °С (табл. 1). Параметры равновесия Grt, Орх в тех же вебстеритах, рассчитанные с помощью гранат-ортопироксенового термобарометра [4], находятся в пределах: 1120–1060 °С; 2,2–2,6 ГПа. На P-T-диаграмме точки Grt–Spl-вебстеритов расположены ниже кривой фазового перехода гранат—шпинель в системе CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂, не содержащей Cr₂O₃ [7], что свидетельствует об образовании Grt в вебстеритах в условиях мантии. Температура Grt–Срх-ассоциации в вебстеритах и клинопироксенитах, определённая по термометру [8] при предполагаемом P = 2,4 ГПа, находится в пределах 1070—1150 °С.

К последующим преобразованиям пироксенитов относятся замещение граната симплектитом, появление амфибола и образование ламелей распада твёрдого раствора в пироксенах. Последнее по времени — частичное плавление с образованием карманов расплава, окружённых каймами новообразованного Срх. Отличие его состава от Срх основной массы позволяет предположить, что событие было краткосрочным и минералы вне зон плавления сохранили свой состав.

Сопоставление химического состава пироксенов и валовых проб пироксенитов с данными экспериментов по кристаллизации базальтовых и андезитовых расплавов (рис. 2) показывает, что пироксениты соответствуют кумулятам, образовавшимся при кристаллизации расплавов при 1,2 ГПа и степени кристаллизации >15% [9]. Первичная магматическая ассоциация изученных пироксенитов была, вероятно, представлена высокоглинозёмистыми пироксенами и шпинелью, близкими к полученным в ходе указанных экспериментов. Высокое содержание Al_2O_3 в пироксенитах не было обусловлено накоплением Pl, поскольку на диаграммах нормированного к примитивной мантии распределения REE в этих пироксенитах отсутствует Еи-аномалия. В экспериментах по плавлению в сухих условиях при 1,5 ГПа содержание Al₂O₃ в клинопироксенах значительно ниже — порядка 4 мас.% [11], а при 2 и 3 ГПа [2, 12] они содержат больше Al, Na и обладают меньшей Mg# по сравнению с нашими образцами (рис. 1). Кроме того, в экспериментах при 2,0 ГПа на ликвидусе отсутствует Spl, а при оливиннормативном составе и Орх. Это означает, что при большем или меньшем давлении и в сухих условиях состав кумулятов существенно другой.

Таким образом, реликты гипидиоморфнозернистой структуры, Spl—Opx—Cpx-состав первичной минеральной ассоциации и высокое содержание Al в пироксенах указывают на кристаллизацию высокоглинозёмистых пироксенитов как кумулятов из водосодержащих базальтовых (толеитовых и известково-щелочных) расплавов при 1,2 ГПа и выше [9, 10], но ниже 2,0 ГПа, когда из расплава кристаллизуются Grt, Cpx [2, 12].

Для того чтобы поднимающийся базальтовый расплав не смог достичь поверхности и испытал дифференциацию при ~1,2 ГПа, необходим вышележащий слой пород с плотностью, меньшей чем у расплава, и мощностью ~40 км. На о. Шпицберген существование мощного гранитоидного слоя и проявление известково-щелочного базальтового магматизма известны в раннем протерозое (метабазиты Атомфьелла) [3] и в позднем протерозое—раннем палеозое (метавулканиты Кап-Ханстен и др.), т.е. такая возможность в регионе существовала.

В заключение отметим следующее. Пироксениты с высоким содержанием MgO, Al₂O₃ и низким Cr₂O₃, вероятно, образовались как Spl—Opx—Cpx-кумуляты при кристаллизации водосодержащих базальтовых магм вблизи границы кора—мантия. Преобразование структуры и смена минеральных ассоциаций свидетельствуют об их последующем перемещении в мантию, на глубины, большие, чем граница фазового перехода Spl \rightarrow Grt в системе CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂. Это указывает на деламинацию в регионе континентальной коры, содержавшей ультрамафические кумуляты.



Рис. 2. Соотношение Al_2O_3 и MgO в ксенолитах высокоглинозёмистых пироксенитов, в кумулятах, образовавшихся при кристаллизации водосодержащих базальтовых и андезитовых расплавов при 1,2 ГПа и степени кристаллизации более 15% [9]. На диаграмме также приведены составы минералов, полученных в экспериментах [2, 9, 12].

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК том 485 № 5 2019

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Jull M., Kelemen P.B. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № B4. P. 6423–6446.
- Pertermann M., Hirshmann M. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № B2. P. 2125.
- 3. Евдокимов А.Н., Сироткин А.Н. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2011. 270 с.
- 4. *Гончаров А.Г., Никитина Л.П., Боровков Н.В. и др. //* Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 11. С. 2000– 2030.
- 5. Богомолов Е.С., Марин Ю.Б., Никитина Л.П. // ДАН. 2015. Т. 460. № 5. С. 570–573.

- 6. Никитина Л.П., Гончаров А.Г., Салтыкова А.К. и др. // Геохимия. 2010. № 1. С. 9–28.
- Robinson J.A.C., Wood B.J. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1998. V. 164. P. 277–284.
- *Ravna E.K.* // J. Metamorph. Geol. 2000. V. 18. P. 211–219.
- 9. *Müntener O., Kelemen P., Grove T. //* Contribs Mineral. and Petrol. 2001. V. 141. P. 643–658.
- 10. Melekhova E., Blundy J., Robertson R., Humphreys M. // J. Petrol. 2015. V. 56. P. 161–192.
- *Lambart S., Laporte D., Schiano P. //* Earth and Planet. Sci. Lett. 2009. V. 288. P. 335–347.
- Green T., Blundy J., Adam J., Yaxley G. // Lithos. 2000.
 V. 53. P. 165–187.

HIGH-ALUMINA PYROXENITE XENOLITHS FROM QUATERNARY BASALTS OF NW SPITSBERGEN — EVIDENCE OF CONTINENTAL CRUST DELAMINATION

M. Yu. Koreshkova¹, Corresponding Member of the RAS Yu. B. Marin², L. P. Nikitina³, H. Downes⁴, A. Tokusheva¹, A. G. Goncharov¹

 ¹ Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation
 ² Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation
 ³ Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation
 ⁴ Birkbeck University of London, London, United Kingdom

Received October 29, 2018

The origin of spinel–garnet pyroxenite from xenoliths in Quaternary basaltoids of Spitsbergen Island (Svalbard Archipelago) is discussed. The rocks have a high concentration of Al_2O_3 and MgO and low Cr. The primary magmatic association Spl–Opx–Cpx and the high Al content in pyroxenes provide evidence for the formation of these rocks as cumulates of hydrous basaltic melts in the lower crust at a pressure of ~1.2 GPa. Transformation of the texture from the magmatic hypidiomorphic to the metamorphic granoblastic and growth of garnet at the expense of spinel and high-alumina pyroxenes indicate transport of rocks to a depth below the spinel/garnet phase transition boundary in the Cr₂O₃-free CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂ system. The parameters of the Grt–Opx equilibrium range within 1060–1120 °C and 2.2–2.6 GPa. Thus, magmatic pyroxenite was transported to a great depth into the mantle, which provides evidence for delamination in the region of the lower continental crust containing ultramafic cumulates.

Keywords: pyroxenites, garnet, spinel, continental crust delamination.