



## ГЕОХИМИЯ ШПИНЕЛИ ИЗ КСЕНОЛИТОВ МАНТИЙНЫХ ЛЕРЦОЛИТОВ (ВУЛКАН СВЕРРЕ, АРХИПЕЛАГ ШПИЦБЕРГЕН)

Д.С.АШИХМИН<sup>1</sup>, Ю.-С.ЧЕН<sup>2</sup>, С.Г.СКУБЛОВ<sup>3</sup>, А.Е.МЕЛЬНИК<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup> *Школа наук о Земле и Космосе Университета науки и технологий Китая, Хэфэй, Китай*

<sup>3</sup> *Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия*

В работе представлены результаты исследования (метод LA-ICP-MS) шпинели из коллекции мантийных ксенолитов лерцолитов (семь ксенолитов), отобранных в четвертичных щелочных базальтах вулкана Сверре, архипелаг Шпицберген. Исследование двух крупных (более 15 см в диаметре) ксенолитов позволило изучить изменения состава минералов в центральной, промежуточной и краевой части образцов хромдиопсидовых шпинелевых лерцолитов. Установлен синусоидальный характер распределения REE в шпинелях, свидетельствующий о проявлении мантийного метасоматоза.

Впервые полученные результаты по редкоземельному составу для шпинелей из мантийных ксенолитов в щелочных базальтах архипелага Шпицберген дополняют опубликованные в мировой литературе данные по геохимии шпинелей мантийного происхождения.

**Ключевые слова:** шпинель, мантийные ксенолиты, мантийный метасоматоз, геохимия минералов, LA-ICP-MS, архипелаг Шпицберген

**Как цитировать эту статью:** Геохимия шпинели из ксенолитов мантийных лерцолитов (вулкан Сверре, архипелаг Шпицберген) / Д.С.Ашихмин, Ю.-С.Чен, С.Г.Скублов, А.Е.Мельник // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 511-517. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.511

**Введение.** Изучение мантийных ксенолитов – единственный источник информации о глубинном строении Земли. Ксенолиты являются свидетелями и участниками процессов, протекающих в мантии, и несут в себе информацию о минералогических и геохимических изменениях, связанных с миграцией и перераспределением вещества.

Выбор шпинели для детального минералого-геохимического исследования ксенолитов и реконструкции процессов, происходящих в мантии, не случаен. Шпинель является наиболее стабильным и устойчивым к вторичным изменениям минералом, который стремится сохранить свой первичный состав, что важно при изучении строения верхней мантии Земли [6].

В данной работе представлены результаты исследования шпинели из коллекции мантийных ксенолитов (семь ксенолитов), отобранных в четвертичных щелочных базальтах вулкана Сверре, архипелаг Шпицберген. В нашем распоряжении было два крупных (более 15 см в диаметре) ксенолита, что позволило изучить изменения состава минералов в центральной, промежуточной и краевой части образцов хромдиопсидовых шпинелевых лерцолитов.

Мантийные ксенолиты были извлечены на поверхность четвертичными щелочными базальтовыми расплавами. По уже существующим данным шпинелевые лерцолиты подверглись, как минимум, двум значительным процессам: деплетированию, вызванному частичным плавлением, а затем воздействию мантийного метасоматоза [3]. На минеральном уровне последний процесс характеризуется появлением новообразованных минералов, развивающихся по первичным минералам ксенолитов, в частности, следует отметить образование новой генерации шпинели (рис.1).

**Аналитические методы.** Химический состав минералов на уровне главных элементов определен методом SEM-EDS в ИГГД РАН на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6510LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200. Тонкие полированные пластинки пород напылялись углеродом. Точечные определения состава минералов выполнялись с использованием электронного луча с ускоряющим напряжением в 20 кВ и током 1 нА, размер пятна пучка составлял 3 мкм. Время накопления каждого спектра 35 с, в качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды и металлы. Для коррекции матричного эффекта использовался алгоритм ZAF.

Редкоземельные и редкие элементы были измерены методом LA-ICP-MS в Лаборатории корово-мантийного вещества и обстановок Университета науки и технологий Китая. Подробные

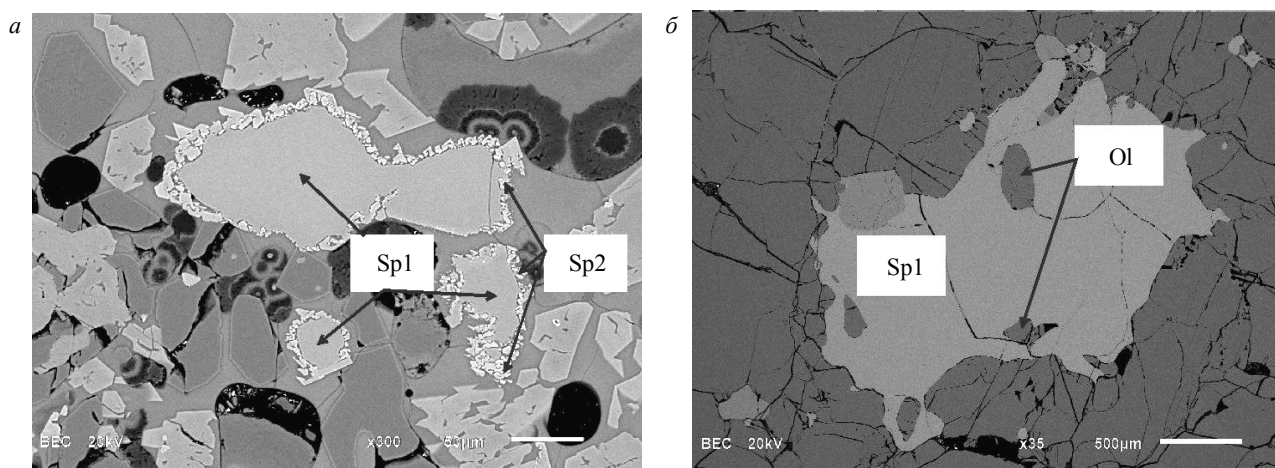


Рис. 1. Изображение в режиме BSE шпинелей из мантийных ксенолитов: *а* – шпинель первой генерации Sp1 обрастает кристаллами второй генерации Sp2; *б* – включение оливина Ol в зерне шпинели

условия работы системы лазерной абляции и инструмента ICP-MS и обработки данных приведены в работе [5]. Применялись лазер GeLAS 2005 193 нм ArF и масс-спектрометр Agilent 7900 ICP-MS. В качестве газа-носителя использовался гелий. Аргон использовался в качестве добавочного газа и смешивался с газом-носителем через T-образный соединитель перед входом в ICP.

Каждый анализ состоял из замера фона (~20-30 с) и анализа собственно образца (50 с). Содержание элементов было откалибровано по широко распространенным стандартам (BCR-2G, BIR-1G, BHVO-2G и GSE-1G), стандарт NIST 610 использовался для калибровки дрейфа сигнала во время анализа. Размер пятна анализа составлял 32-44 мкм. Обработка фоновых и аналитических сигналов, коррекция временного смещения и количественная калибровка выполнена с помощью программы ICPMSDataCal [4, 5]. Сигнал с временным разрешением для каждого анализа тщательно проверялся на скачки содержания каждого элемента, и в большинстве случаев была выбрана только «чистая» часть спектра с плавной интенсивностью сигнала. Точность и воспроизводимость анализа, основанная на повторном анализе стандартов, для большинства редких элементов не хуже  $\pm 10\%$  ( $2\sigma$ ).

**Результаты и обсуждение.** По петрографическому составу ксенолиты представлены шпинелевыми перцолитами следующего минерального состава, типичного для данных пород: оливин (80 %), клинопироксен (13 %), ортопироксен (5 %), шпинель (2 %). Шпинель делится на две генерации: первую – кристаллы, возникшие из первоначального расплава, и вторую, связанную с процессом мантийного метасоматоза (рис. 1, *а*).

Шпинель первой генерации представлена ксеноморфными кристаллами, расположенными в межзерновом пространстве оливина и клинопироксена. Размер кристаллов шпинели варьирует от 50 мкм до первых миллиметров. По своему химическому составу первая генерация шпинели относится к герциниту, содержание  $Al_2O_3$  составляет в среднем 53 %,  $Cr_2O_3$  – 13 % по массе. Индивидуальные зерна шпинели в целом не зональны по составу, однако, при сравнении состава разных зерен шпинели даже в пределах одного образца наблюдается изменение содержания главных элементов.

Мелкие кристаллы второй генерации размером в среднем 5 мкм имеют более идиоморфный облик и обрастают в виде мелкой щетки зерна шпинели первой генерации (рис. 1, *а*). По содержанию главных элементов шпинель второй генерации отличается от первой генерации пониженным содержанием глинозема (до 42 % по массе) и увеличением содержания  $Cr_2O_3$  в среднем на 20 %. Мелкий размер кристаллов второй генерации не позволяет исследовать их методом лазерной абляции, поэтому ниже обсуждается редкоэлементный состав шпинели только первой генерации.

Представительные составы шпинелей первой генерации по данным LA-ICP-MS приведены в таблице. Содержание оксидов главных элементов по данным LA-ICP-MS хорошо согласуется с результатами анализа шпинелей на электронном микроанализаторе – среднее содержание глинозема по данным лазерной абляции также составляет 53,1 % по массе. Стоит отметить, что в груп-



ных ксенолитах SH-1 и SH-2 заметны достаточно сильные колебания в содержании глинозема в зависимости от области образца, из которой были отобраны шпинели. Так, в центральной, промежуточной и краевой зоне содержание глинозема в шпинелях имеет следующие средние значения – 55,5, 51,8 и 50,8 % по массе, соответственно. Для остальных ксенолитов характерно выдержанное содержание глинозема (в среднем 54 %), близкое к составу шпинели из центральной части крупных ксенолитов.

Состав шпинели по данным LA-ICP-MS

Образец	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Ti	V	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Sn	Mg #	Cr #	D <sub>melt</sub>
	% по массе				ppm										
SH-1b-1b-15 (центральная часть ксенолита SH-1)	21,7	53,3	11,6	11,5	533	399	803	286	3275	2,58	1236	1,11	38,0	40,8	18,94
	21,3	53,5	12,1	11,4	434	405	781	270	3296	2,72	1242	0,98	39,1	42,0	19,43
	22,0	53,0	11,8	11,5	440	397	843	278	3258	3,00	1220	1,04	38,5	41,3	19,14
	21,5	53,5	11,6	11,6	433	410	819	275	3297	3,71	1266	0,94	37,7	40,5	18,79
	21,7	53,3	11,8	11,5	438	407	804	281	3578	3,43	1307	1,16	38,4	41,2	19,11
	21,5	53,3	11,9	11,6	456	404	789	272	3225	3,14	1184	1,02	38,3	41,1	19,04
	21,9	53,7	11,3	11,4	440	431	797	279	3284	2,67	1247	0,74	37,6	40,5	18,78
	21,5	53,2	11,6	11,8	440	400	819	296	3214	3,50	1295	1,02	37,4	40,3	18,69
	21,0	54,9	11,3	11,2	447	390	773	276	3063	3,10	1190	0,60	38,0	40,8	18,91
	21,7	53,7	11,2	11,6	427	391	799	299	3375	2,90	1276	1,08	37,0	39,8	18,50
SH-1b-2b-15 (промежуточная часть ксенолита SH-1)	20,6	51,1	14,1	12,3	491	470	829	267	2950	2,48	1176	0,91	41,2	44,1	20,33
	20,6	51,5	13,8	12,4	494	458	811	253	2829	1,93	1080	0,79	40,4	43,3	19,98
	20,3	50,7	14,7	12,4	536	481	846	259	2864	2,54	1240	0,93	41,8	44,7	20,58
	21,1	49,8	14,3	12,9	476	457	842	264	2967	2,38	1144	0,99	40,3	43,2	19,96
	21,0	50,1	14,1	12,9	483	465	880	274	3015	2,60	1223	1,18	40,0	42,8	19,79
SH-1b-3b-15 (краевая часть ксенолита SH-1)	20,8	51,1	13,9	12,3	495	464	847	266	3063	2,04	1218	1,16	40,8	43,7	20,17
	20,4	51,6	14,0	12,1	507	511	841	266	2966	3,01	1151	0,98	41,2	44,1	20,31
	20,6	51,6	13,9	12,1	481	469	857	258	2994	2,89	1133	0,91	41,2	44,1	20,34
	20,4	51,9	13,8	12,1	495	467	831	261	2897	2,28	1183	0,95	41,0	43,9	20,24
	20,8	51,1	13,9	12,2	486	461	834	261	2958	2,62	1192	1,22	40,8	43,7	20,16
SH-2b-1b-15 (центральная часть ксенолита SH-2)	21,4	55,0	10,1	11,2	390	360	790	276	3257	3,51	1309	1,10	35,5	38,2	17,83
	21,2	56,0	10,1	11,1	401	363	798	280	3330	2,95	1290	1,14	35,7	38,5	17,92
	21,5	55,6	10,0	11,4	352	359	804	285	3309	2,61	1384	0,90	34,9	37,7	17,59
	21,5	55,9	10,0	11,1	352	354	798	277	3258	2,61	1319	0,77	35,4	38,1	17,78
	21,1	56,4	10,3	10,8	439	367	766	264	3097	3,12	1210	0,91	36,6	39,3	18,30
	21,9	55,2	10,4	11,1	417	371	791	278	3251	3,34	1278	0,85	36,3	39,0	18,17
	21,5	55,6	10,4	11,1	423	369	786	279	3228	2,65	1263	0,78	36,2	38,9	18,13
	21,6	55,0	10,4	11,4	440	371	813	288	3433	2,74	1302	1,09	35,8	38,6	17,99
	21,5	55,2	10,3	11,5	445	368	800	281	3280	3,24	1248	0,90	35,3	38,1	17,75
	21,7	54,8	10,7	11,3	440	364	811	286	3295	2,79	1241	1,02	36,5	39,3	18,27
SH-2b-2b-15 (промежуточная часть ксенолита SH-2)	20,7	52,0	14,3	11,6	442	443	762	248	2780	2,42	1073	0,41	42,7	45,7	20,99
	21,1	51,3	14,4	11,9	440	442	776	250	2771	2,36	1075	0,25	42,3	45,3	20,82
	21,0	51,1	14,7	11,8	453	448	780	257	2821	2,65	1068	0,45	43,1	46,0	21,15
	21,3	50,4	15,2	11,8	482	455	796	261	2860	2,12	1111	0,44	43,9	46,8	21,47
	21,0	51,5	14,6	11,5	468	441	791	260	2860	2,45	1096	0,44	43,5	46,4	21,31
	21,4	50,6	14,6	11,9	442	446	811	270	3012	2,04	1152	0,39	42,8	45,8	21,04
	21,1	50,9	14,7	11,9	441	442	807	269	3048	2,52	1140	0,24	42,7	45,6	20,98
	21,0	50,9	15,0	11,7	424	437	811	267	2974	2,46	1120	0,59	43,8	46,7	21,44
	21,1	51,1	14,5	11,9	454	444	805	267	3001	2,36	1131	0,38	42,5	45,4	20,89
	21,0	51,4	14,4	11,8	446	444	808	271	3009	2,45	1117	0,31	42,5	45,5	20,90
	20,8	50,1	15,6	12,1	480	455	847	266	2898	2,64	1116	0,28	43,8	46,7	21,44
	20,7	50,0	15,6	12,2	482	460	822	268	2944	2,67	1116	0,51	43,7	46,7	21,42
	20,9	51,0	14,6	12,1	428	445	809	265	2979	2,17	1112	0,42	42,3	45,3	20,82
	20,4	50,4	15,3	12,4	445	456	824	266	2889	2,52	1151	0,45	42,9	45,9	21,07



Окончание таблицы

Образец	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Ti	V	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Sn	Mg #	Cr #	D <sub>melt</sub>
	% по массе				ppm										
SH-2b-3b-15 (краевая часть ксенолита SH-2)	20,4	51,8	14,5	11,9	453	453	794	259	2925	2,38	1138	0,55	42,5	45,5	20,90
	21,3	50,5	14,3	12,3	444	439	792	259	2891	2,37	1103	0,56	41,4	44,3	20,43
	21,1	50,6	14,7	12,1	455	452	787	259	2816	2,17	1121	0,42	42,4	45,3	20,85
	21,0	51,0	14,4	12,2	450	451	798	257	2876	2,42	1075	0,48	41,6	44,5	20,52
	21,3	51,1	14,2	12,0	442	459	779	257	2849	2,19	1084	0,33	41,9	44,8	20,64
	21,0	50,9	14,9	11,8	465	450	809	254	2810	2,19	1057	0,53	43,5	46,4	21,31
SH-4-15	22,0	54,4	11,7	10,4	432	384	730	255	3096	4,23	1124	0,38	40,5	43,3	20,00
	22,1	54,6	11,4	10,5	428	380	718	250	3018	3,10	1083	0,34	39,8	42,7	19,74
	22,2	54,5	11,5	10,3	491	394	719	254	3158	3,02	1072	0,40	40,4	43,3	19,99
	22,0	54,9	11,4	10,3	461	394	733	255	3141	3,50	1116	0,46	40,2	43,1	19,89
	22,6	55,0	11,1	9,9	461	411	694	245	3004	3,26	1084	0,43	40,4	43,3	19,98
	21,8	55,4	11,5	9,9	484	406	701	250	2998	3,54	1079	0,38	41,3	44,2	20,39
	22,2	55,1	11,5	9,8	488	392	705	251	3125	3,16	1079	0,46	41,7	44,6	20,55
	22,1	54,2	12,0	10,1	514	417	735	269	3167	2,85	1118	0,48	41,8	44,7	20,59
	22,0	54,2	12,2	10,2	429	397	746	256	3182	3,21	1089	0,36	42,2	45,1	20,74
	22,0	55,2	11,5	9,8	450	386	728	262	3180	3,32	1128	0,37	41,7	44,6	20,53
	21,5	55,3	11,8	10,0	456	388	737	260	3218	3,57	1116	0,39	41,7	44,6	20,55
	21,8	54,8	11,8	10,1	511	413	736	261	3142	3,28	1114	0,38	41,4	44,3	20,41
	22,5	54,1	12,0	9,9	446	415	746	269	3141	3,15	1130	0,33	42,4	45,4	20,87
	22,0	54,4	11,7	10,6	479	410	736	265	3151	3,44	1130	0,37	40,2	43,0	19,87
21,7	55,3	11,9	9,7	415	387	731	263	3052	3,16	1140	0,23	42,6	45,6	20,94	
SH-5-15	21,0	53,1	11,9	12,4	471	444	799	266	2846	1,48	1181	0,55	36,7	39,5	18,38
	20,3	54,4	11,8	11,8	484	395	768	259	2972	2,10	1127	0,50	37,9	40,7	18,88
	19,9	52,3	14,2	12,0	442	398	826	255	2707	1,52	1147	0,47	41,8	44,7	20,60
	20,1	52,4	13,6	12,1	418	444	824	262	2770	2,54	1121	0,72	40,5	43,4	20,01
	21,0	53,7	10,9	12,6	464	399	789	260	2886	3,99	1178	0,63	34,5	37,2	17,40
	20,6	52,5	11,5	13,6	468	404	843	296	2973	2,10	1177	0,64	34,0	36,7	17,18
	21,3	52,0	13,4	11,6	427	425	762	263	2761	1,79	1114	0,38	41,2	44,1	20,32
	20,7	53,6	11,8	12,3	409	404	821	266	2895	1,69	1181	0,62	36,8	39,6	18,42
	20,5	53,5	11,9	12,4	415	408	831	266	2952	1,50	1186	0,44	36,9	39,7	18,46
	22,5	52,5	11,5	11,9	433	396	794	269	2904	1,99	1181	0,55	36,9	39,8	18,47
	20,8	52,8	13,2	11,6	458	409	748	249	2841	1,63	1179	0,47	40,8	43,7	20,14
	20,9	54,3	10,6	12,4	479	403	776	258	3038	1,60	1156	0,55	34,2	36,9	17,27
	20,9	53,6	11,8	12,0	429	422	829	268	2871	1,86	1224	0,55	37,4	40,2	18,68
	20,4	52,5	13,7	11,8	494	392	751	243	2835	1,67	1116	0,36	41,3	44,2	20,36
20,7	54,0	11,0	12,6	471	401	805	259	2965	2,26	1239	0,47	34,8	37,5	17,52	
SH-6-15	22,3	54,0	11,6	10,7	519	395	738	252	3050	3,11	1054	0,37	39,9	42,8	19,75
	22,0	54,9	11,1	10,5	454	383	706	249	2954	2,92	1085	0,29	39,1	41,9	19,40
	21,7	55,2	11,1	10,6	499	391	707	249	3069	3,13	1076	0,29	38,9	41,7	19,31
	21,6	55,5	11,2	10,3	466	390	703	255	3041	3,14	1042	0,38	39,7	42,5	19,66
	21,6	54,7	11,9	10,5	522	407	736	247	2929	2,97	1091	0,43	40,8	43,6	20,13
SH-7-15	21,0	52,7	11,7	12,6	476	409	848	282	3143	1,92	1247	0,45	36,2	38,9	18,13
	20,7	53,7	11,5	12,2	467	434	825	274	3024	1,80	1270	0,56	36,4	39,1	18,21
	20,6	53,8	11,3	11,9	431	404	803	255	2833	5,51	828	0,61	36,7	39,5	18,35
	20,6	53,4	12,5	11,8	480	397	774	260	3048	2,48	1193	0,50	39,1	42,0	19,41
	21,1	54,3	10,8	12,0	509	411	793	335	3122	2,51	1185	0,43	35,3	38,1	17,76

Магнезиальность  $Mg\# = Mg/(Mg \times Fe_{tot}) \times 100\%$  в изученных образцах шпинелей варьирует, наблюдается отличие по этому показателю даже в пределах одного образца (см. таблицу). В крупных ксенолитах магнезиальность шпинелей носит выдержанный характер, но только в своей зоне. Так, в ксенолитах SH-1 и SH-2 в центральной части среднее значение магнезиально-

сти равно 35,8, в промежуточной – 40,7, а в краевой зоне – 38,0. Такой характер зональности возможно объяснить, наличием в промежуточной части крупных ксенолитов микровключений оливина в шпинели по данным электронной микроскопии. Дальнейшее взаимодействие флюидов с микровключениями оливина приводит к перераспределению части магния во вмещающую оливин шпинель [3].

Хромистость  $Cr\# = Cr/(Cr \times Fe_{tot}) \times 100$  % шпинели варьирует от 36,7 до 46,8 без определенных закономерностей. Так, в одном образце данный показатель может изменяться от 38,1 до 42,0 (см. таблицу). В крупных ксенолитах заметно увеличение хромистости от центра к краю. Вероятнее всего, это связано с мантийным метасоматозом, проявленном в виде процессов частичного плавления, которое испытали исследуемые ксенолиты [7]. Степень частичного плавления возможно оценить при помощи уравнения регрессии [1]:

$$D_{melt} = 0,426 \times Cr\# + 1,538,$$

где  $D_{melt}$  – степень частичного плавления, %;  $Cr\#$  – показатель хромистости в шпинелидах, %.

Степень частичного плавления составляет в среднем около 20 %, не превышая 21,5 % (см. таблицу). Наиболее сильно степень частичного плавления представлена в промежуточной части крупных ксенолитов, а не в краевой. Такая закономерность, вероятней всего, связана с градиентом температуры в крупных ксенолитах при процессах мантийного метасоматоза, при котором флюид неравномерно воздействует на весь объем крупного ксенолита.

По соотношению главных элементов наблюдается закономерная обратная корреляция содержания в шпинелях MgO и FeO (рис.2, а) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис.2, б), обусловленная изоморфными замещениями этих пар элементов. В отношении корреляции хрома с другими элементами стоит особо отметить зависимости, связанные с марганцем (рис.2, в). На графике четко вырисовываются два тренда, принципиально отличающиеся по характеру корреляции содержания в

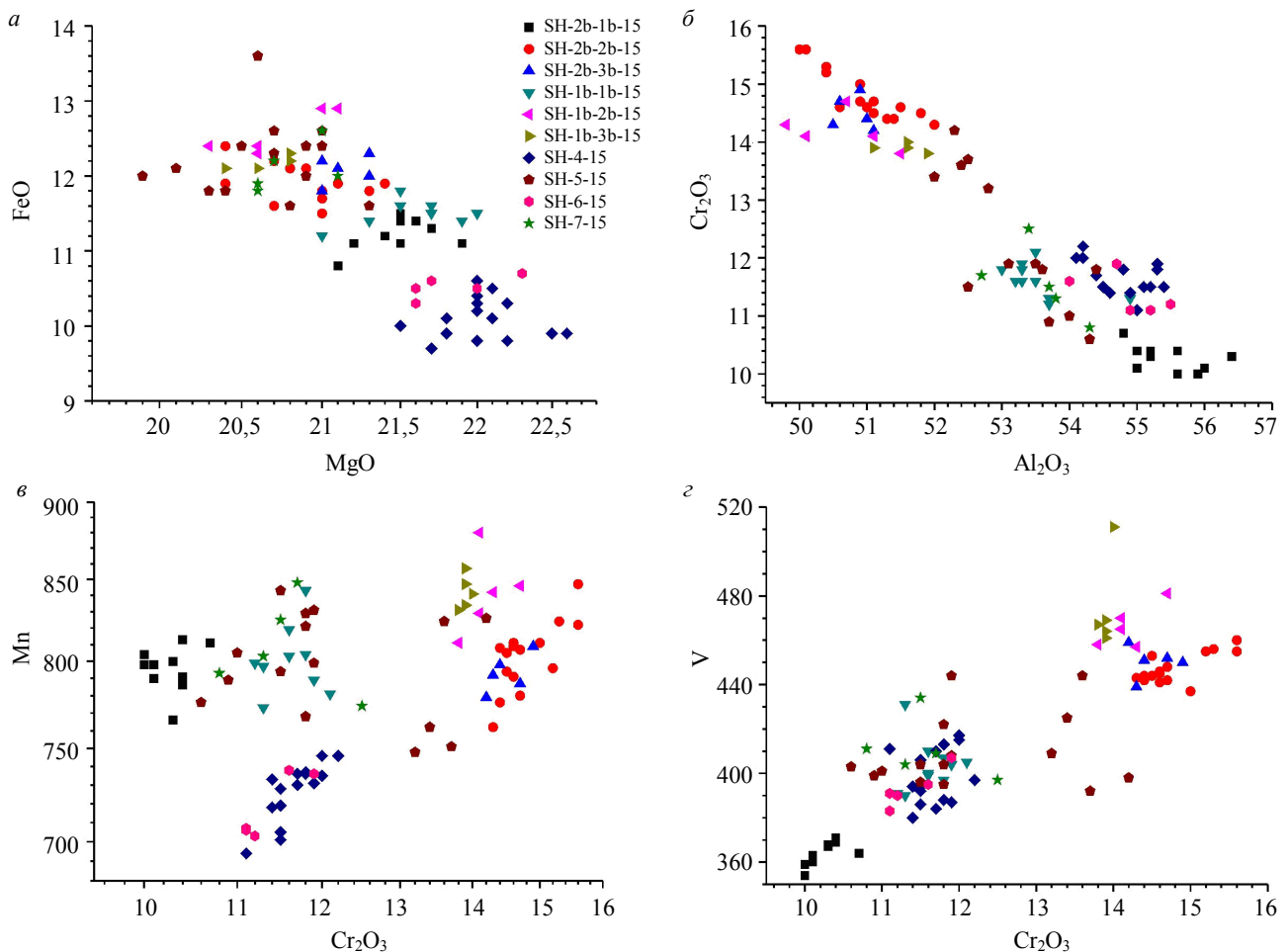


Рис.2. Состав шпинелей из мантийных ксенолитов вулкана Сверре

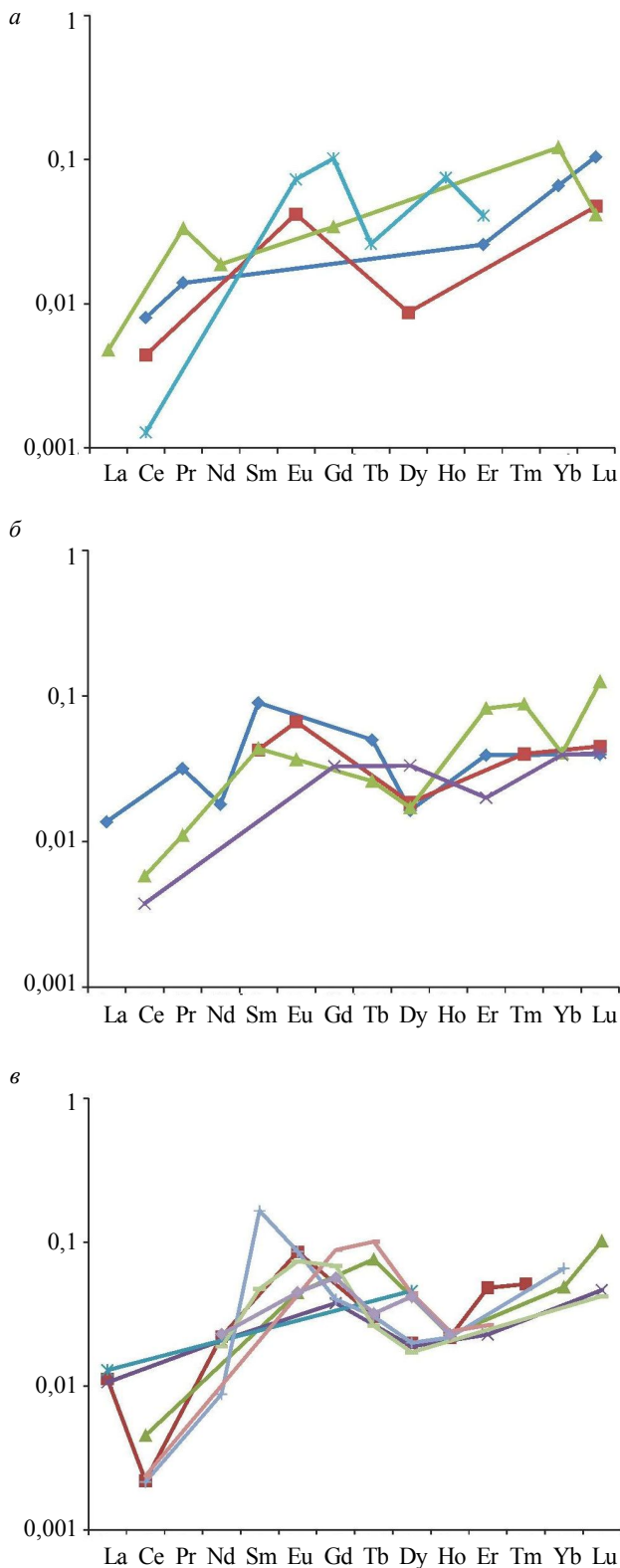


Рис.3. Спектры распределения, нормированные на состав хондрита CI, редкоземельных элементов в шпинелях из ксенолита SH-1: а – центральная, б – промежуточная, в – крайняя часть

шпинелях  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и Mn. Для крупных ксенолитов в центральных и промежуточных частях, а также в ксенолитах меньшего размера (SH-4-15, SH-6-15) наблюдается положительная корреляция этих элементов, для крайних частей и ксенолитов меньшего размера (SH-5-15, SH-7-15) – менее значимая отрицательная корреляция. Столь неоднозначное распределение достаточно сложно интерпретировать. Отметим прямую зависимость для всех рассматриваемых образцов шпинелей между содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и V (рис.2, з), что является типичным для ксенолитов верхней мантии.

Среднее содержание железа в рассматриваемых шпинелях составляет 11,5 %, при минимальном значении 9,8 % и максимальном 13,6 %. В крупных ксенолитах содержание FeO достаточно выдержанное в каждой зоне, в то время как в небольших ксенолитах вариации содержания железа довольно значительны (см. таблицу).

Распределение редкоземельных элементов (REE) в шпинелидах представляет собой достаточно сложный вопрос, так как до настоящего времени точно не установлено, какую позицию занимают ионы REE в кристаллической решетке минерала. Однако стоит отметить, что в работе Ф.П.Леснова [2] выдвигается предположение, что наиболее вероятными кандидатами, позицию которых в шпинелидах занимают трехвалентные ионы HREE, являются ионы  $\text{V}^{\text{III}}\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{V}^{\text{III}}\text{Mg}^{2+}$ . Данные по содержанию REE в шпинелях весьма лимитированы и затрагивают в основном хромшпинелиды (обзор в [2]).

Нами приводятся представительные анализы содержания REE в шпинелях. Среднее суммарное содержание редкоземельных элементов в изученных зернах не превышает 0,12 ppm, а спектры распределения REE имеют ярко выраженный синусоидальный облик с точками перегиба, соответствующих Dy и, в ряде случаев, Ho (рис.3). Такое распределение редкоземельных элементов является нетипичным для шпинелидов, так как при анализе литературы (обзор в [2]) было установлено, что типичные спектры распределения REE в шпинелях демонстрируют плавное понижение от легких к тяжелым REE. Ранее было установлено, что синусоидальный характер спектров распределения REE в минералах, в частности, в мантийных гранатах, наряду с другими особенностями состава является индикатором мантийного метасоматоза [8].

Нормированное содержание легких REE во всей представительной выборке шпинелей увеличивается от La до Eu и далее, до Gd. В некоторых шпинелях содержание La и Ce находится ниже порога чувствительности метода LA-ICP-MS. Eu-аномалия в ряде образцов имеет неясно



выраженный положительный характер (рис.3). Содержание тяжелых REE носит резко дифференцированный характер, от Gd до Dy наблюдается уменьшение нормированных содержаний, а минимальное значение среди HREE имеет Ho, который является точкой перегиба с последующим увеличением нормированных содержаний элементов от Er до Lu.

Таким образом, впервые получены результаты (метод LA-ICP-MS) по редкоземельному составу шпинелей из мантийных ксенолитов перцолитов в щелочных базальтах архипелага Шпицберген, дополняющие опубликованные в мировой литературе данные по геохимии шпинелей мантийного происхождения.

**Благодарности.** Авторы благодарят д-ра геол.-минерал. наук А.Н.Сироткина (ПМГРЭ) за предоставленные образцы ксенолитов и канд. геол.-минерал. наук О.Л.Галанкину (ИГГД РАН) за проведение аналитических работ. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базовой и проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 5.9248.2017/ВУ на 2017-2019 гг.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Геохимия акцессорных хромшпинелидов из пород Эргаского хромитоносного гипербазитового массива и условия его формирования (Западный Саян) / Ф.П.Леснов, М.Ю.Подлипский, Г.В.Поляков, Г.В.Палесский // Доклады АН. 2008. Т. 422. № 5. С. 660-664.
2. Леснов Ф.П. Редкоземельные элементы в ультрамафитовых и мафитовых породах и минералах. Кн. 2. Второстепенные и акцессорные минералы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 190 с.
3. Carbonate-bearing mantle peridotite xenoliths from Spitsbergen: phase relationships, mineral compositions and trace element residence / D.A.Ionov, S.Y.O'Reilli, Y.S.Genshaft, M.G.Kopylova // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1997. Vol. 125. P. 375-392.
4. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths / Y.S.Liu, S.Gao, Z.Hu et al. // Journal of Petrology. 2010. Vol. 51. P. 537-571.
5. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard / Y.S.Liu, Z.Hu, S.Gao et al. // Chemical Geology. 2008. Vol. 257. P. 34-43.
6. Kamenetsky V.S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks / V.S.Kamenetsky, A.J.Crawford, S.Meffre // Journal of Petrology. 2001. Vol. 42. P. 655-671.
7. Mechanisms and sources of mantle metasomatism: major and trace element compositions of peridotite xenoliths from Spitsbergen in the context of numerical modeling / D.A.Ionov, J.-L.Bodinier, S.B.Mukasa, A.Zanetti // Journal of Petrology. 2002. Vol. 43. P. 2219-2259.
8. Metasomatic processes in lherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle: REE in garnets from xenoliths and inclusions in diamonds / T.Stachel, K.S.Viljoen, G.Breya, J.W.Harris // Earth and Planetary Science Letters. 1998. Vol. 159. P. 1-12.

**Авторы:** Д.С.Ашихмин, геолог, Dmitry\_Ashihmin@vsegei.ru (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург, Россия), Ю.-С.Чен, д-р наук, доцент, uxchen07@ustc.edu.cn (Школа наук о Земле и Космосе Университета науки и технологий Китая, Хэфэй, Китай), С.Г.Скублов, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, skublov@yandex.ru (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия), А.Е.Мельник, канд. геол.-минерал. наук, младший научный сотрудник, aleks@melnik.me (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия).

Статья принята к публикации 29.05.2017.