

УДК 553.21/24

ГЕОХИМИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В РУДНОМ ЭВДИАЛИТОВОМ КОМПЛЕКСЕ ЛОВОЗЕРСКОГО РЕДКОМЕТАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

© 2020 г. Академик РАН Л. Н. Когарко*

Поступило 04.02.2020 г.

После доработки 10.02.2020 г.

Принято к публикации 10.02.2020 г.

Редкоземельные элементы относятся к разряду стратегических металлов. Крупнейшие месторождения стратегического сырья связаны с щелочно-карбонатитовыми формациями. На Кольском полуострове и Полярной Сибири расположены крупнейшие щелочно-карбонатитовые комплексы мира, обладающие высоким потенциалом стратегического сырья включая редкие земли. Целью исследования была оценка редкоземельного потенциала рудного эвдиалита Ловозерского месторождения. Методом масс-спектрометрии с индукционно-связанной плазмой было исследовано 120 зерен эвдиалитовых руд. Среднее содержание суммы редких земель в эвдиалитах рудного эвдиалитоносного комплекса 12 566 г/т, что значительно выше суммы редких земель в апатитах пяти месторождений Хибинского массива. Учитывая многие миллионы тон нефелиновых сиенитов эвдиалитоносного комплекса и практически линейный тренд редкоземельных спектров для эвдиалита, можно сделать вывод о чрезвычайной ценности эвдиалитового месторождения Ловозерского массива.

Ключевые слова: Ловозерский комплекс, редкометальные месторождения, Полярная Сибирь, редкие земли

DOI: 10.31857/S2686739720040088

Редкоземельные элементы относятся к разряду стратегических металлов. Крупнейшие месторождения стратегического сырья связаны с щелочно-карбонатитовыми формациями. На Кольском полуострове и Полярной Сибири расположены крупнейшие щелочно-карбонатитовые комплексы мира, обладающие высоким потенциалом стратегического сырья включая редкие земли. Интенсивное развитие современных новых технологий в мировой экономике ведет к значительному росту потребления редкоземельных металлов (РЗМ) и их стоимости. Это требует усиления фундаментальных и прикладных работ по геохимии и развитию прогнозно-поисковых критериев редкоземельных руд. Крупнейший в мире Ловозерский массив агпаитовых нефелиновых сиенитов (Кольский полуостров) содержит суперкрупное месторождение эвдиалитовых руд — источник циркония, гафния и редких земель.

Ловозерский щелочной массив, расположенный в центральной части Кольского полуострова, занимает площадь в 650 км² и сформировался в три главные интрузивные фазы [1].

Эвдиалитовый комплекс Ловозерского массива (третья интрузивная фаза) составляет около 18% от общего объема массива. Комплекс сложен слабодиссоцированными толщами эвдиалитовых лужавритов, секущими и пластовыми полевошпатовыми, ловозеритовыми и мурманит-лампрофиллитовыми порфиroidными лужавритами (около 2%). Главными породообразующими минералами эвдиалитовых лужавритов являются нефелин (23%), эгирин (17%), амфибол (15%), микроклин (20%) и эвдиалит (около 25%). Эвдиалитовые руды расположены в апикальной части эвдиалитового комплекса в виде пластовых и линзовидных тел небольшого размера (несколько метров протяженностью). Это мономинеральные породы, главный породообразующий минерал — эвдиалит. В небольших количествах присутствует нефелин, эгирин, микроклин, арфведсонит.

Методом масс-спектрометрии с индукционно-связанной плазмой (масс-спектрометр Термофиниган Нептун) *in situ* LA-ICP-MS мы проанализировали около 120 отобранных зерен эвдиалитов

Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: kogarko@geokhi.ru

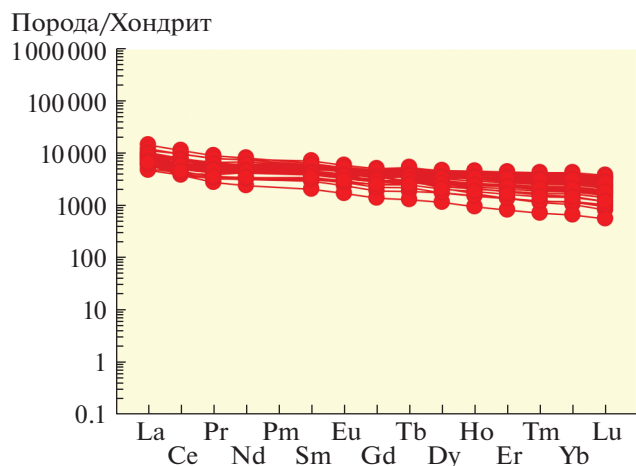


Рис. 1. Распределение REE в эвдиалитах рудоносного эвдиалитового комплекса.

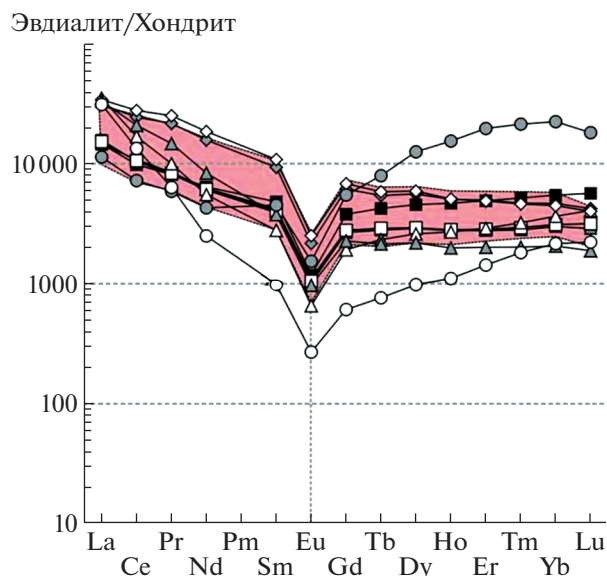


Рис. 2. Распределение редких земель в эвдиалитах различных пород Илимауссакского массива.

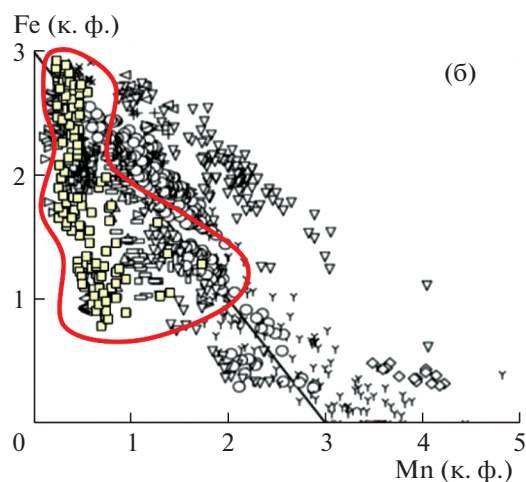
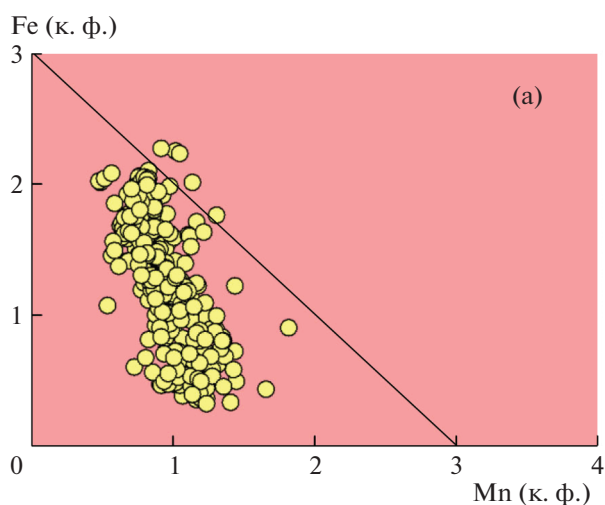


Рис. 3. Сопоставление составов эвдиалитов Ловозерского месторождения (а) и эвдиалитов массива Илимауссак (выделенная область); (б) – остальные данные эвдиалитов других щелочных массивов мира.

из эвдиалитовых луавритов, эвдиалитовых руд, пегматитов, кроме того, ряд других цирконосиликатов. Анализы были проведены в Университете Франкфурта и ГЕОХИ РАН. Суммарное количество редких земель в различных эвдиалитах щелочных пород варьирует в широких пределах 0–10.2% REE₂O₃ [2]. РЗМ совместно с Na, K, Sr располагаются в крупных N-полиэдрах в позиции, которую занимает Са, причем легкие редкие земли (элементы Се-группы) занимают более крупные N-полиэдры, а тяжелые (Y-группа) Са–октаэдры либо позицию М2 – пятивершинники [3]. Среднее содержание суммы редких земель в эвдиалитах рудного эвдиалитоносного комплекса

по нашим данным – 18849 г/т, что близко к средней сумме редких земель в эвдиалитах Илимауссакского комплекса нефелиновых сиенитов (16900 г/т) и значительно выше средней суммы РЗМ в апатитах пяти месторождений Хибинского массива [4]. В ряде щелочных массивов эвдиалиты содержат значительно более высокие концентрации редких земель, например – эвдиалит массива Монт-Сан Элле содержит 3.3% суммы редких земель. Это связано, по всей вероятности, с широким полем кристаллизации лопарита – главного минерала-концентратора РЗМ Ловозерской интрузии. Лопарит содержит до 30% суммы редких земель. По нашим данным коэффициент распре-

Таблица 1. Примеры распределение REE в эвдиалитах Ловозерского месторождения

№ образца	Глубина Ловозерского месторождения	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Ce/Yb
Eudalite 1a	196	1188	2548	367	1973	653	217	718	137	666	144	395	57	382	49	9494	6.66
Eudalite 1b	196	1505	3205	422	1991	617	199	607	115	731	147	395	56	365	46	10399	8.77
Eudalite 1c	196	1393	3011	405	2106	704	223	716	138	814	164	445	64	421	54	10659	7.16
Eudalite 2a	135	1751	3538	472	2366	778	269	802	153	905	187	506	72	472	60	12331	7.50
Eudalite 2b	135	2087	4389	583	2864	901	293	861	159	901	179	475	66	434	55	14249	10.11
Eudalite 2c	135	1925	3959	529	2619	839	276	847	158	910	184	487	68	440	55	13297	9.00
Eudalite 3a	178	2079	3939	497	2313	744	257	769	150	895	187	517	74	487	62	12971	8.08
Eudalite 3b	178	1820	3607	470	2320	764	269	799	154	895	187	507	72	467	60	12391	7.73
Eudalite 3c	178	2031	3946	508	2460	815	278	833	163	959	199	542	76	501	64	13376	7.88
Eudalite 4a	96	1687	3389	436	2071	639	215	616	112	635	129	339	47	308	39	10661	11.02
Eudalite 4b	96	2164	4735	631	3155	873	241	712	110	543	94	224	29	177	21	13708	26.79
Eudalite 4c	96	2144	4535	587	2816	826	265	766	136	749	147	393	54	356	45	13820	12.74
NIST610-3	63	1537	3300	434	2068	606	203	566	104	582	116	306	43	283	36	10184	11.65
Eudalite 5b	5	1107	2320	306	1460	443	138	387	69	442	86	226	31	196	24	7235	11.83
Eudalite 5c	63	1385	2988	395	1930	583	189	569	105	592	117	308	43	279	36	9519	10.71
Eudalite 6a	63	2645	5870	748	3454	906	273	760	128	654	120	298	40	252	30	16177	23.32
Eudalite 6b	5	1810	3664	470	2242	694	231	699	129	751	150	396	55	348	43	11681	10.54
Eudalite 6c	5	3381	6850	841	3741	971	301	825	140	752	144	368	50	324	39	18729	21.16
Eudalite 7a	5	2409	4838	604	2802	802	247	737	133	740	145	377	52	338	43	14265	14.33
Eudalite 7b	245	2177	4355	560	2704	859	289	902	178	1066	226	633	91	609	81	14729	7.15
Eudalite 7c	245	2855	5833	743	3530	1077	337	1029	198	1142	240	651	93	626	83	18435	9.32
Eudalite 8a	295	2162	4359	547	2642	853	281	906	184	1112	240	682	101	664	88	14819	6.56
Eudalite 8b	295	2144	4383	564	2705	872	291	913	184	1099	236	665	97	648	86	14885	6.76
Eudalite 8c	295	2303	4397	537	2466	779	252	869	177	1085	235	663	96	640	84	14583	6.87
Eudalite 9a	287	1373	2703	340	1591	502	161	513	100	703	149	413	59	388	49	9045	6.97
Eudalite 9b	287	1940	3869	486	2352	776	254	839	169	1016	221	614	89	601	79	13304	6.44
Eudalite 9c	287	2308	4484	546	2553	785	265	811	161	985	212	590	86	570	76	14432	7.87
Eudalite 10a	304	2365	4692	590	2824	911	311	955	192	1169	255	719	107	715	95	15900	6.56
Eudalite 10b	304	1964	3998	511	2477	798	278	857	170	1056	230	642	93	616	81	13772	6.49
Eudalite 10c	304	2225	4431	570	2762	885	295	937	189	1138	244	693	101	672	89	15229	6.60
Eudalite 11a	377	1845	3692	462	2157	655	223	711	143	888	195	562	82	541	72	12227	6.82
Eudalite 11b	377	1976	3774	457	2106	624	199	661	134	842	186	531	77	514	68	12151	7.34
Eudalite 11c	377	1663	3467	442	2059	609	207	601	114	668	138	370	53	349	46	10788	9.92
Eudalite 12a	-1509	1388	2313	260	1112	312	98	283	48	290	53	134	18	111	14	6434	20.75
Eudalite 12b	-1509	1404	2493	310	1479	476	159	454	82	438	85	223	30	202	26	7861	12.37
Eudalite 12c	-1509	1538	2713	332	1571	523	170	509	92	517	104	270	37	241	30	8648	11.24
Средние		1935	3905	499	2384	735	240	732	139	815	169	460	66	432	56	12566	10.36

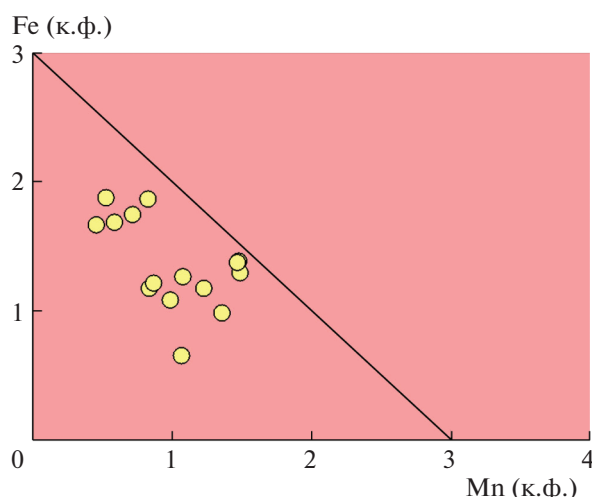


Рис. 4. Распределение Mn и Fe в эвдиалитах пегматитов Ловозерского месторождения.

деления редких земель в равновесии лопарит–щелочной расплав составляет около 100–157 [5].

Спектр редкоземельных металлов эвдиалитов рудного комплекса ($Ce/Yb = 10.36$) резко отличается от особенностей распределения REE в лопарите ($Ce/Yb = 7500$) и апатите ($La/Yb = 600$). В эвдиалите нет преобладания содержаний легких РЗМ над тяжелыми (рис. 1) – это определяет высокую ценность эвдиалитовых руд так как группа Y-редких земель заметно дороже Ce-группы редкоземельных металлов. Учитывая многие миллионы тонн нефелиновых сиенитов эвдиалитоносного комплекса и практически линейный тренд редкоземельных спектров для эвдиалита, можно сделать вывод о чрезвычайной ценности эвдиалитового месторождения Ловозерского массива (табл. 1, рис. 1). Спектры РЗМ эвдиалитов не имеют европиевой аномалии, что говорит о нефелинитовом характере первичной магмы Ловозерского месторождения, в процессе дифференциации которой, кристаллизация и фракционирование плагиоклаза отсутствует. Спектры РЗМ эвдиалитов Илимауссакского месторождения также характеризуются линейным характером [2], однако имеют отрицательную европиевую аномалию (рис. 2), так как, по мнению [5], первичная магма этой интрузии имеет щелочно-базальтовый состав, в ходе эволюции которой отмечается широкое поле кристаллизации плагиоклаза, имеющего высокий коэффициент распределения Eu^{+2} в равновесии плагиоклаз–расплав.

Интересной особенностью составов эвдиалитов из разных щелочных массивов [2] (рис. 3, 4) является отрицательная корреляция Fe и Mn. Некоторые авторы считают [2], что двухатомное отношение Mn/Fe в эвдиалитах является показателем степени дифференцированности исходной

магмы. Отношение Mn/Fe в эвдиалитах месторождения Илимауссак 0.16, а в эвдиалитах Ловозерских руд – 0.95. По нашему мнению, степени дифференцированности месторождений Гренландии и Кольского полуострова очень близки, и разница, скорее всего, обусловлена различным составом родоначальных магм (щелочно-базальтовый для Илимауссакского массива и нефелинитовый для Ловозера). Различный характер фракционирующих минеральных фаз в щелочных расплавах непременно должен приводить к разнице химического состава остаточных расплавов. Так, например, в эвдиалитах пегматитов Ловозерского месторождения отношение Mn/Fe – 0.81 даже ниже по сравнению с рудными эвдиалитами.

Важной особенностью эвдиалитов Ловозерского месторождения являются повышенные содержания скандия до 85 ppm. В эвдиалитах месторождения Илимауссак (Гренландия) концентрация скандия ниже (32–38 ppm). Скандий – очень ценный элемент, в России повышенные содержания скандия установлены только в карбонатитах Ковдорского массива. Попутное извлечение скандия из эвдиалитовых руд может значительно повысить стоимость эвдиалитового сырья [2].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы по государственному заданию № 0137-2019-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н. Поляков А.И., Сапрыкина Т.В., Балашов Ю.А. Геохимия Ловозерского щелочного массива / М.: Наука. 1966. 392 с.
2. Schilling J., Wu F.Y., Mccammon C., Wenzel T., Marks M.A.W., Pfaff K., Jacob D.E., Markl G. The Compositional Variability of Eudialyte-group Minerals // Mineralogical Magazine. 2011. V. 75(1). P. 87–115.
3. Расцветаева Р.К., Чуканов Н.В., Аксенов С.М. Минералы группы эвдиалита: кристаллохимия, свойства, генезис / Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского. 2012. 229 с.
4. Kogarko L.N. Chemical Composition and Petrogenetic Implications of Apatite in the Khibiny Apatite-Nepheline Deposits (Kola Peninsula) // Minerals. 2018. V. 8. P. 532.
5. Kogarko L.N., Williams C.T., Wooley A.R. Chemical Evolution and Petrogenetic Implication of Loparite in the Layered, Apatitic Lovozero Complex, Kola Peninsula, Russia // Mineral Petrol. 2002. V. 74(1). P. 1–24.

POTENTIAL OF RARE-EARTH METALS IN EUDIALITES OF THE ORE ALKALI COMPLEX OF LOVOZERSKYMASSIV

Academician of the RAS L. N. Kogarko[#]

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]*E-mail: kogarko@geokhi.ru*

Rare earth elements belong to the category of strategic metals. The largest deposits of strategic raw materials are associated with alkaline-carbonatite formations. The largest alkaline-carbonatite complexes of the world are located on the Kola Peninsula and Polar Siberia, which have high potential for strategic raw materials, including rare earths. Using inductively coupled plasma mass spectrometry (ThermoFinnigan Neptune mass spectrometer) in situ LA – ICP – MS, 120 eudialyte grains from eudialyte ores were studied. The average content of the amount of rare earths in the eudialytes of the ore eudialite complex is – 12566 g/t, which is significantly higher than the sum of the rare earths in the apatites of five deposits of the Khibiny massif. Considering the many millions of tons of nepheline syenites of the eudialytonic complex and the almost linear trend of rare-earth spectra for eudialite, it can be concluded that the eudialyte deposit of the Lovozero massif is extremely valuable.

Keywords: Lovozersky complex, rare metal deposits, polar Siberia, rare earths