

УДК 553.21/24

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ КРУПНЕЙШИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

© 2023 г. Академик РАН Л. Н. Когарко^{1,*}

Поступило 14.06.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принято к публикации 16.08.2023 г.

Проведена работа по оценке редкоземельного потенциала главных рудных минералов Ловозерского и Хибинского месторождений. С гигантской Ловозерской интрузией (Восточная Фенноскандия, Кольский полуостров) связаны месторождения лопарита и эвдиалита. В Хибинском комплексе находится ряд месторождений апатит-нефелиновых руд. Все эти руды занимают ведущее место в структуре сырьевой базы России. Наиболее высокие содержания суммы редкоземельных металлов (РЗМ) характерны для лопаритовых руд (содержание ΣREE в лопаритах около 28 мас. %), причем легкие редкие земли резко преобладают над тяжелыми (отношение Ce/Yb около 78 000). Сумма РЗМ в эвдиалитах составляет около 2 мас. %. Замечательной особенностью эвдиалитовых руд является высокая концентрации группы тяжелых РЗМ (отношение Ce/Yb составляет около 14). Апатиты Хибинских месторождений занимают промежуточное положение: отношение Ce/Yb составляет 680, а средняя концентрация суммы РЗМ — 0.9 мас. %. Рассмотрены условия формирования апатитовых, лопаритовых и эвдиалитовых руд.

Ключевые слова: лопарит, эвдиалит, апатит Ловозерское, Хибинское месторождения

DOI: 10.31857/S268673972360128X, **EDN:** IGCHIU

В августе 2022 г. Правительство Российской Федерации утвердило новый перечень дефицитных стратегических металлов, таких как REE, Nb, Ta, Zr, Hf, U, Th, Sc, Li. В последние годы особое внимание уделяется редкоземельным металлам (РЗМ), так как они являются жизненно важными компонентами во многих современных технологиях — для высокопрочных магнитов, двигателей электромобилей, аккумуляторов, люминесцентного освещения, металлургии, керамики и других отраслей промышленности.

В Европе с целью создания основы для развития европейских технологий были организованы крупные научно-исследовательские проекты EURARE и ASTER, направленные на оценку запасов и качества редкоземельного сырья Европы [1].

Из всех формаций горных пород мира наиболее высокий рудный потенциал редкоземельных металлов отмечается в щелочных породах и карбонатах, которые контролируют весь мировой рынок этих элементов. Россия занимает первое место в мире по распространенности щелочно-

карбонатитового магматизма. Это отражается и в мировых запасах. По запасам редких земель Россия находится на втором месте после Китая. Однако по переработке редких земель Россия значительно отстает и занимает 2% от мирового производства.

Почти 90% всех РЗЭ, поступающих на мировой рынок, производится в Китае (месторождение карбонатитов Баян Обо, [2]).

Наиболее крупные месторождения редких литофильных металлов связаны с высокотемпературными магматическими процессами. В низкотемпературных гидротермальных месторождениях, генезис которых связан с подвижностью и переотложением редкоземельных металлов, их концентрации могут также достигать значительных величин.

Геодинамическое положение месторождений РЗМ варьирует. Большинство месторождений связаны с внутриконтинентальными рифтовыми зонами, например, мезопротерозойская провинция Гардар на юго-западе Гренландии — крупнейшее в мире месторождение редкоземельных металлов — связано с мезопротерозойскими карбонатами Китая, формирование которых произошло в результате континентального рифтинга. С плюмовым магматизмом также связаны крупные проявления ультраосновных щелочно-карбонати-

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kogarko@geokhi.ru

Таблица 1. Примеры состава REE лопаритов, эвдиалитов, апатитов Ловозерских и Хибинских месторождений

РЗМ	Хибинский массив		Ловозерское месторождение			
	Подстилающий уртит апатит	Апатитовая руда апатит	Нижняя зона интерстициальный лопарит	Лопаритовые рудные горизонты кумулятивный лопарит	Дифференцированный комплекс интерстициальный эвдиалит	Эвдиалитовый комплекс кумулятивный эвдиалит
La	1787	2152	84516	37873	1462	1188
Ce	2468	3202	153760	67520	2634	2548
Pr	228	309	13972	6529	304	367
Nd	812	1111	38696	19817	1312	1973
Sm	95.31	156	2246	1422	322	653
Eu	25.25	45	310	208	92	217
Gd	68.06	122	888	533	267	718
Tb	6.20	14	43.35	28.09	46	137
Dy	24.44	64	126	82.14	253	666
Ho	3.69	10	7.96	5.04	48	144
Er	6.68	21	9.62	5.88	124	395
Tm	0.53	2	0.58	0.33	18	57
Yb	2.33	9.3	1.95	1.15	116	382
Lu	0.27	1	0.15	0.07	14	49
ΣREE	5527	7218	294579	134024	7012	9494

товых пород и редкоземельные месторождения, например, в восточной части Фенноскандии и Маймеча-Котуйской провинции (Полярная Сибирь).

Основные минералы-концентраторы РЗМ высокощелочных интрузий представлены апатитом, эвдиалитом, лопаритом, стенструпином и пироксеном. Определенная часть редкоземельных металлов концентрируется в минералах-носителях РЗМ, таких как ловозерит, лампрофиллит, ринколит и др.

Главной целью работы является оценка редкоземельного потенциала главных минералов-концентраторов лопаритового, эвдиалитового и апатитового месторождений Ловозерского и Хибинского комплексов в Кольской щелочной провинции (табл. 1). С гигантской Ловозерской интрузией (Восточная Фенноскандия, Кольский полуостров) связаны крупные месторождения лопарита и эвдиалита. В Хибинском комплексе находится ряд крупных месторождений апатитовых руд. Все эти месторождения занимают ведущее место в структуре сырьевой базы России и являются одними из главных источников редких земель, ниобия, тантала, циркония, гафния и потенциально радиоактивного сырья.

Главными методами исследования рудных минералов по всему разрезу месторождений являлись микрозонд – САМЕСА-100 и масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой для лазер-

ной абляции (LA-ICP-MS) (ГЕОХИ РАН), использовались стандарты Смитсониевского Института.

Ловозерский расслоенный массив (625 км²) [3] представляет собой плутон, сформированный, в основном, тремя интрузивными фазами: 1 – среднезернистые нефелиновые и нозеановые сиениты, 2 – Дифференцированный комплекс уртитов-фойяитов-луявритов, 3 – эвдиалитовые луйавриты. Лопаритовые руды приурочены к отдельным горизонтам Дифференцированного комплекса и связаны в основном с уртитовыми прослоями. Рудные горизонты, обогащенные лопаритом до нескольких %, прослеживаются до глубины 870 м. (расстояние от нижнего контакта Дифференцированного комплекса). Лопарит в рудных горизонтах является ранним магматическим идиоморфным минералом. Ниже по разрезу лопарит меняет порядок и формы кристаллизации. В самой нижней зоне (ниже 870 м от нижнего контакта) лопарит встречается как поздний интерстициальный ксеноморфный минерал. Щелочная магма Ловозера становится насыщенной в отношении лопарита после кристаллизации около 25% магматической камеры. Проведенные исследования также выявили ряд особенностей форм выделения и состава лопарита. В табл. 1 показаны примеры составов идиоморфного и интерстициального лопарита.

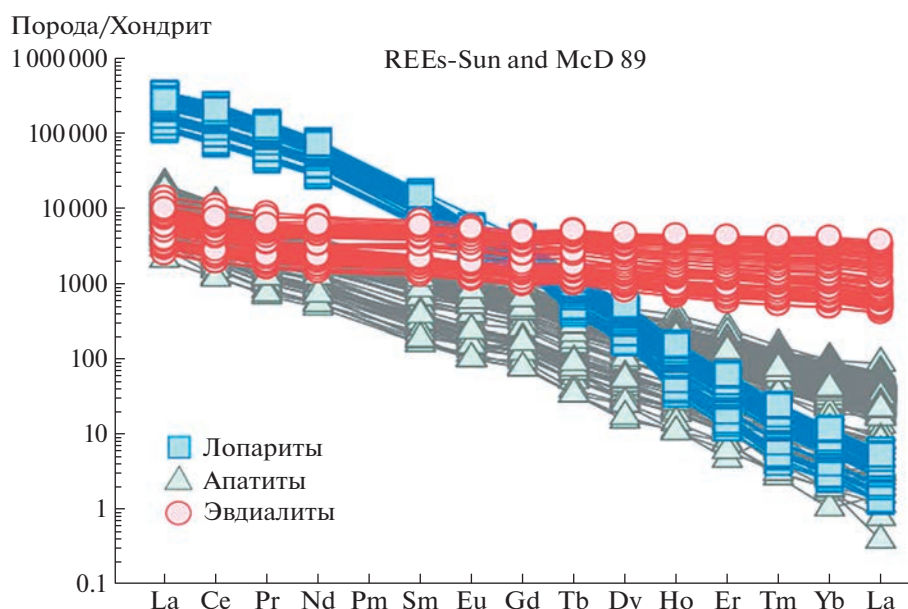


Рис. 1. Распределение редкоземельных металлов в рудных минералах лопарите, эвдиалите и апатите Ловозерского и Хибинского месторождений.

Лопарит является главным минералом-концентратором РЗМ в Ловозерской интрузии и содержит до 28 мас. %, причем легкие РЗМ значительно преобладают над тяжелыми (рис. 1). Ce/Yb-отношение чрезвычайно высокое и составляет 78 000 — это одно из самых высоких соотношений среди минералов, содержащих РЗМ. Стратиграфически вверх по разрезу интрузии лопарит обедняется суммой РЗМ, падает отношение легкой группы РЗМ к тяжелой Ce/Yb (рис. 2). Таким образом, наиболее перспективный на редкие земли лопарит приурочен к нижним частям разреза Ловозерского месторождения. На основании приведенных фактов нами было доказано [4], что смена форм выделения лопарита (и времени его кристаллизации) представляет собой геохимический критерий рудоносности щелочных магм на редкие земли, ниобий, тантал, титан и перспективно уран и торий [4].

Месторождение эвдиалитовых руд в Ловозеро также относится к разряду крупнейших и является источником редких земель, циркония, гафния и ниобия. Содержание редкоземельных металлов представлено в табл. 1. Несмотря на более низкие содержания в эвдиалите суммы редкоземельных элементов (в среднем около 2%) по сравнению с лопаритами, в эвдиалите значительно более высокие отношения тяжелых к легким РЗМ — отношение Ce/Yb составляет 14. Таким образом, рудный эвдиалит является уникальным источником более ценных тяжелых редкоземельных металлов.

Детальные петрографические исследования всего вертикального разреза Ловозерского место-

рождения установили смену форм выделения эвдиалита. Во всем интервале глубин Дифференцированного комплекса эвдиалит кристаллизуется на позднемагматическом этапе, он образует ксеноморфные выделения, приуроченные к интерстициям породообразующих минералов [5]. Рудные скопления эвдиалита не образуются. Вверх по разрезу 3 фазы (на глубинах порядка 400 м от верхнего контакта) эвдиалит становится ранним минералом, образует хорошо оформленные идиоморфные кристаллы. Формы выделения эвдиалита по идиоморфизму не отличаются от нефелина, полевого шпата, амфибола и эгирина, что указывает на их одновременную кристаллизацию на раннемагматической стадии. Эвдиалит совместно с главными породообразующими минералами образует скопления, и формируется магматическая расслоенность. На этой стадии возникают эвдиалитовые руды. Насыщение исходной магмы в отношении эвдиалита происходит после кристаллизации около 85% Ловозерской интрузии.

Апатито-нефелиновые месторождения связаны с ийолит-уртитовой интрузией Хибинского комплекса [3].

Применение разработанного нами геохимического прогнозного критерия рудоносности показало, что апатитоносная интрузия Хибин была с самого начала кристаллизации насыщена в отношении апатита и содержала 2.4 мас. % P_2O_5 [6]. Апатит кристаллизовался на ранней стадии вместе с нефелином. Значительная разница в размере кристаллов апатита (0.3 мм) и нефелина (4 мм) привела к разделению этих минералов. В процес-

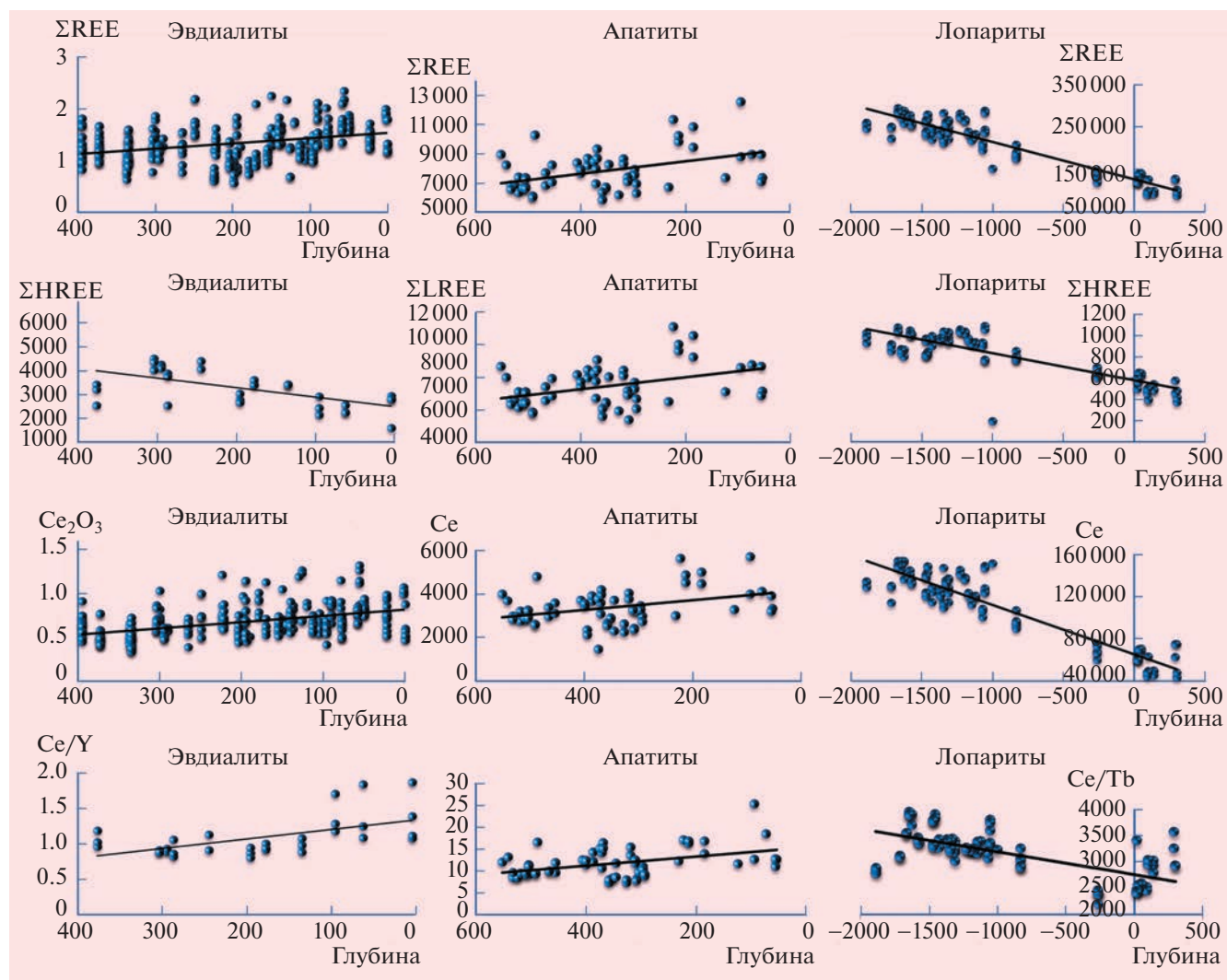


Рис. 2. Распределение редкоземельных элементов в лопаритах и эвдиалитах в вертикальных разрезах Ловозерских месторождений и в апатитах Хибинского месторождения.

се активной конвекции мелкие кристаллы апатита всплывали, образуя апатитовую руду, а более крупные выделения нефелина тонули, формируя мощный пласт массивного уртита. Среднее содержание суммы РЗМ в апатитах 4 месторождений Хибин составляет 0.9 мас. %, отношение $Ce/Yb = 680$.

Интересной особенностью рудных минералов — лопарита, эвдиалита и апатита — является связь характера распределения в них редкоземельных металлов и уровня-заполнения осадком магматических камер Ловозерского и Хибинского месторождений (рис. 2). Наличие скрытой расслоенности рудных минеральных фаз доказывает решающую роль в генезисе редкометалльных месторождений процессов кристаллизационной дифференциации. Для лопаритов величина комбинированных коэффициентов распределения выше единицы, в

то время как для апатитов и эвдиалитов эта величина ниже единицы (за исключением тяжелых РЗМ для эвдиалитов Ловозерского месторождения) (рис. 2).

Необходимым условием формирования редкометалльных месторождений является ранняя насыщенность магматического расплава в отношении рудных минеральных фаз, в таком случае процессы конвекции приводят к образованию магматической расслоенности и рудных скоплений.

ВЫВОДЫ

Полученные материалы показали, что рудные лопариты Ловозерского месторождения в значительной степени обогащены редкими землями (до 28 мас. %), причем легкая группа значительно

преобладает над тяжелой ($Ce/Yb = 78000$), в то время как эвдиалитовые руды (в среднем содержат 2 мас. %) значительно обогащены тяжелой группой РЗМ (Ce/Yb составляет 14). Апатитовые руды Хибинского месторождения (в среднем содержат 0.9 мас. %) занимают промежуточное положение ($Ce/Yb = 680$). Рудные минералы Ловозерского и Хибинского месторождений — лопарит, эвдиалит и апатит — являются ранними магматическими минералами, и характер распределения в них редкоземельных металлов является результатом двух факторов: величины коэффициентов распределения и содержания РЗМ в исходной щелочной магме.

Формы выделения и время кристаллизации рудных минералов (лопарита, эвдиалита и апатита) являются прогнозным критерием рудоносности. Необходимым условием формирования магматических редкометалльных месторождений является ранняя насыщенность магматического расплава в отношении рудных минеральных фаз.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств по Госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goodenough K.M., Schilling J., Jonsson E., Kalvig P., Charles N., Tuduri J., Dedy E.A., Sadeghi M., Schiellerup H., Müller A., Bertrand G., Arvanitidis N., Eliopoulos D.G., Shaw R.A., Thrane K., Keulene N. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 72. P. 838–856.
2. Wübbeke J. Rare earth elements in China: policies and narratives of reinventing an industry // *Resour. Policy*. 2013. № 38. P. 384–394.
3. 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. 398 с.
4. Когарко Л.Н. Особенности формирования лопаритовых руд (Ловозерское редкометалльное месторождение, Восточная Фенноскандия) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 2. С. 137–140.
5. Kogarko L., Nielsen T.F.D. Chemical Composition and Petrogenetic Implications of Eudialyte-Group Mineral in the Peralkaline Lovozero Complex, Kola Peninsula, Russia // *Minerals*. 2020. № 10. 1036.
6. Когарко Л.Н. Проблемы генезиса гигантских апатитовых и редкометалльных месторождений Кольского полуострова (Россия) // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 5. С. 387–403.

RARE EARTH ELEMENT RESOURCE POTENTIAL OF SUPER-LARGE DEPOSITS IN EASTERN FENNOSCANDIA

Academician of the RAS L. N. Kogarko^{a, #}

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

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

Work has been carried out to assess the rare-earth potential of the main ore minerals -loparite, eudialyte and apatite of the Lovozersky and Khibinsky deposits. Super-large deposits of loparite and eudialyte are associated with the giant Lovozero intrusion (Eastern Fennoscandia, Kola Peninsula). There are a number of apatite deposits in the Khibiny complex. All these ores occupy a leading place in the structure of the raw material of Russia. The highest contents of the sum of rare earth metals are characteristic of loparite ores (the content of ΣREE in loparites is about 28 wt%), and light rare earths sharply prevail over heavy ones, the Ce/Yb ratio is about 78000. The amount of REE in eudialytes is about 2 by mass%. A remarkable feature of eudialyte ores is the high concentrations of the heavy REE group, the Ce/Yb ratio is about 14. The apatites of the Khibiny deposits occupy an intermediate position: the Ce/Yb ratio is 680, and the average concentration of the REE sum is 0.9 wt%. The conditions of formation of apatite, loparite and eudialyte ores are considered.

Keywords: loparite, eudialyte, apatite Lovozerskoye, Khibinskoye deposits