_____ ГЕОХИМИЯ **____**

УДК 553.21/24

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД (ЛОВОЗЁРСКОЕ РЕДКОМЕТАЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ, ВОСТОЧНАЯ ФЕННОСКАНДИЯ)

© 2022 г. Академик РАН Л. Н. Когарко^{1,*}

Поступило 11.04.2022 г. После доработки 22.04.2022 г. Принято к публикации 25.04.2022 г.

С крупнейшим в мире щелочным расслоенным Ловозёрским массивом на Кольском полуострове связано гигантское месторождение лопаритовых руд – источника ниобия, тантала и редкоземельных металлов. В вертикальном разрезе Ловозёрского месторождения в лопарите с глубиной 2450 м отмечаются рост концентраций стронция, урана, отношения Nb/Та и уменьшение концентрации редкоземельных элементов и бария. Детальные исследования показали, что изменение форм выделения лопарита и времени его кристаллизации представляет собой новый геохимический критерий рудоносности щелочных магм на редкометальное сырье (лопаритовые руды). Рудоносными на редкометальное сырье зонами Ловозёрской интрузии являются только те, которые содержат идиоморфный (кумулятивный) лопарит. Самая нижняя зона Ловозёрской интрузии (870 м от нижнего контакта), которая характеризуется ксеноморфным лопаритом, не перспективна на редкометальное сырье. Таким образом, необходимым условием появления магматических редкометальных месторождений кумулятивного типа является ранняя котектическая насыщенность расплава в отношении рудного минерала. В этом случае отмечается идиоморфизм рудных минералов. Если концентрация рудного компонента значительно ниже котектической, то кристаллизация рудного минерала будет осуществляться на поздних стадиях формирования пород в малом объеме интерстициального расплава, когда явления конвективно-гравитационной дифференциации и сегрегации минеральных фаз затруднены, что приведет к рассеиванию рудных компонентов в виде ксеноморфных выделений акцессорных минералов.

Ключевые слова: Восточная Фенноскандия, Ловозёрское редкометальное месторождение, лопаритовые руды, редкие земли, Nb, Ta

DOI: 10.31857/S2686739722080096

Среди магматических формаций мира агпаитовые нефелиновые сиениты характеризуются исключительной продуктивностью. С ними связаны крупнейшие месторождения фосфора, редких литофильных элементов, таких как цирконий, гафний, ниобий, редкоземельные металлы, стронций, уран, торий, алюминий. В индустриально развитых странах потребление этих металлов непрерывно возрастает. С гигантской Ловозёрской интрузией (Восточная Фенноскандия, Кольский полуостров) связано суперкрупное месторождение лопарита, которое занимает ведущее место в структуре сырьевой базы России один из главных источников ниобия, тантала, редких земель и, потенциально, радиоактивного

сырья. Ловозёрский расслоенный массив (625 км²) [1] представляет собой плутон, сформированный тремя интрузивными фазами: 1 — среднезернистые нефелиновые и нозеановые сиениты, 2 — Дифференцированный комплекс уртитов-фойяитов-луявритов, 3 — эвдиалитовые луявриты. Лопаритовые руды приурочены к отдельным горизонтам Дифференцированного комплекса и связаны в основном с уртитовыми прослоями. Рудные горизонты, обогащенные лопаритом, прослеживаются до глубины 870 м (расстояние от нижнего контакта) Дифференцированного комплекса. Ниже по разрезу лопарит встречается как акцессорный минерал.

Проведенные исследования (до глубин 2200—2300 м общего разреза Ловозёрского месторождения) выявили целый ряд особенностей строения и минерального состава. Лопарит исследовался ранее рядом авторов [2—4]. Однако эти данные не полные, так как чувствительность использованных методов не позволяла оценить

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

^{*}E-mail: kogarko@geokhi.ru



Рис. 1. Фотография идиоморфного лопарита (увеличение $10\times$) в шлифе без анализатора.

содержания элементов-примесей – например, тяжелых редких земель, тантала, циркония, гафния и др. В этой работе нами было проанализировано методом in situ LA ICP-MS около 700 зерен лопарита по вертикальному разрезу Ловозёрского месторождения главным образом из зоны кристаллизации идиоморфного лопарита с глубины 870 м от нижнего контакта (рис. 1). Впервые стало возможным построить полный спектр редкоземельных металлов (рис. 2). Лопарит значительно обогащен легкими редкоземельными металлами, среднее отношение Ce/Yb очень высокое и составляет 76500. Стратиграфически вверх по разрезу интрузии лопарит обогащается Sr и U и обедняется Ва и Та, однако заметно возрастает отношение Nb/Ta от 8 до 15 (рис. 3). Особенно резко в лопарите падает содержание редкоземельных элементов – от 26% в нижней зоне до 11% в верхней части разреза, причем не отмечается фракционирования тяжелых и легких РЗМ (рис. 3). Это основной тренд эволюции лопарита в Ловозёрском месторождении. Таким образом, наиболее перспективный на тяжелые и легкие редкие земли лопарит располагается в нижней зоне Ловозёрского месторождения.

Проведенные по всему разрезу Ловозёрского месторождения работы выявили смену форм выделения лопарита снизу вверх в вертикальном разрезе Дифференцированного комплекса. В наиболее глубинной зоне массива лопарит образует ксеноморфные выделения, приуроченные к интерстициям (рис. 4), в то время как с глубины 870 м от нижнего контакта лопарит становится хорошо оформленным, идиоморфным (рис. 1). Смена форм выделения лопарита определяется временем кристаллизации этого минерала. Как было показано нами [5] и другими авторами, формирование расслоенных интрузий, как правило, происходит снизу вверх в результате оседания минералов в процессе кристаллизации и конвективно-

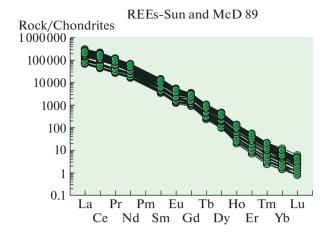


Рис. 2. Распределение REE в лопарите Ловозёрского массива.

го перемешивания. Интерстициальный характер лопарита в самой нижней зоне Ловозёрской интрузии свидетельствует о том, что исходная магма Дифференцированного комплекса Ловозёрского массива не была насыщена в отношении лопарита. В этой части интрузии лопарит выделялся на более поздних стадиях, насыщение расплава в отношении лопарита достигалось после формирования каркаса из породообразующих минералов в небольших объемах интерстициальной жидкости, когда конвекция отсутствует, и лопарит рассеивается, не образуя сегрегаций. Вследствие этого самая нижняя зона Ловозёрской интрузии не рудоносна на лопарит. После формирования около одной трети Дифференцированного комплекса состав расплава становился насыщенным в отношении лопарита, так как редкие земли, ниобий и титан накапливались в процессе эволюции щелочной магмы, и кристаллизация лопарита начиналась на ранних стадиях, определяя идиоморфизм этого минерала. Ранняя кристаллизация лопарита явилась причиной его переноса в большом объеме расплава вместе с породообразующими минералами и сегрегации в отдельных горизонтах в результате процессов гравитационноконвективной дифференциации. Интересно отметить, что смена форм выделения лопарита

Таблица 1. Средний состав лопарита Ловозёрского месторождения

Na ₂ O	8.73	Nb ₂ O ₅	6.61	Sm_2O_3	0.24
CaO	4.75	BaO	0.39	Ta_2O_5	0.51
TiO_2	40.9	La ₂ O ₃	9.1	ThO_2	0.44
FeO	0.29	Ce_2O_3	19.65	UO_2	0.25
SrO	1.17	Pr_2O_3	1.76	Сумма	99.33
Y_2O_3	<0.02	Nd_2O_3	4.53		

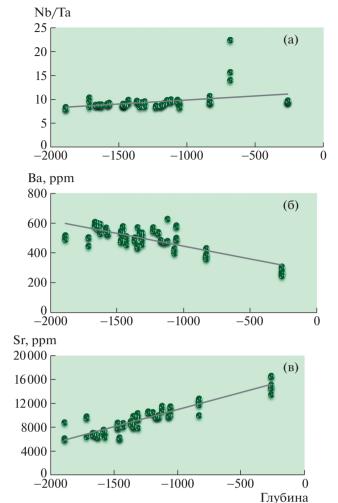


Рис. 3. Распределение Nb/Ta, Ba, Sr в лопарите Ловозёрского массива.

(870 м от нижнего контакта) совпадает с появлением рудных лопаритовых горизонтов — самый нижний рудный горизонт располагается на глубине 1325 м от верхнего контакта Дифференцированного комплекса и 870 м от нижнего.

На основании приведенных фактов можно заключить, что смена форм выделения лопарита (и времени его кристаллизации) представляет собой геохимический критерий рудоносности щелочных магм на редкоэлементное сырье (ниобий, тантал, редкие земли).

Из полученных данных следует, что рудоносными зонами гигантской Ловозёрской интрузии могут быть только те, которые содержат идиоморфный (кумулятивный) лопарит.

Таким образом, необходимым условием появления магматических редкометальных месторождений кумулятивного типа является ранняя котектическая насыщенность расплава в отношении рудного минерала. В этом случае отмечается идиоморфизм рудных минералов. Если концен-

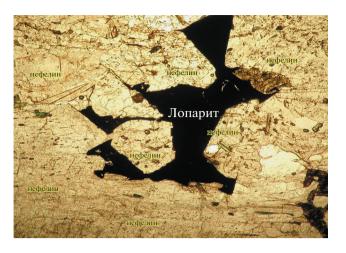


Рис. 4. Фотография ксеноморфного лопарита (увеличение $10\times$) в шлифе без анализатора.

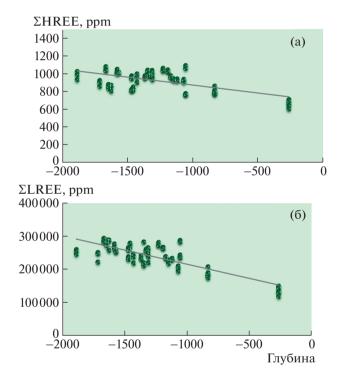


Рис. 5. Содержание REE в лопарите Ловозёрского массива: (a) $-\Sigma$ HREE; (б) $-\Sigma$ LREE.

трация рудного компонента значительно ниже котектической, то кристаллизация рудного минерала будет осуществляться на поздних стадиях формирования пород в малом объеме интерстициального расплава, когда явления конвективногравитационной дифференциации и сегрегации минеральных фаз затруднены, что приведет к рассеиванию рудных компонентов в виде ксеноморфных выделений акцессорных минералов. Принцип ранней котектической насыщенности магмы в отношении рудного минерала, как необ-

ходимое условие возникновения магматических руд кумулятивного типа, может быть распространен на формации ультраосновных и основных пород. Процессы гравитации и конвективного перемешивания, сопряженные с накоплением магматического осадка на дне интрузии и химической эволюцией щелочного расплава, являются главными механизмами формирования лопаритовых руд.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы по государственному заданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Сапрыкина Т.В., Балашов Ю.А. Геохи-

- мия Ловозёрского щелочного массива. М., Наука, 1966. 395 с.
- 2. *Воробьева О.А.* К генезису лопаритовых месторождений Ловозёрских тундр // Известия Академии наук СССР. 1938. Геол. Сер. 3.
- 3. Mitchell R.H., Chakhmouradian A.R. Compositional Variation of Loparite from the Lovozero Alkaline Complex, Russia // Can Mineral. 1996. V. 34. P. 977–990.
- Kogarko L.N., Williams C.T., Wooley A.R. Chemical Evolution and Petrogenetic Implications of Loparite in the Layered, Agpaitic Lovozero Complex, Kola Peninsula, Russia // Mineralogy and Petrology. 2002. V. 74. P. 1–24.
- Kogarko L.N., Nielsen T.F.D. Chemical Composition and Petrogenetic Implications of Eudialyte-Group Mineral in the Peralkaline Lovozero Complex, Kola Peninsula, Russia // Minerals. 2020. V. 10. P. 1036. https://doi.org/10.3390/min10111036

2022

FORMATION OF LOPARITE ORES (LOVOZERO RARE METAL DEPOSIT, EASTERN FENNOSCANDIA)

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

^a Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation [#]E-mail: kogarko@geokhi.ru

The world's largest alkaline stratified Lovozero massif (Kola Peninsula) is associated with a giant deposit of loparite ores – a source of niobium, tantalum and rare earth metals. In the vertical section of the Lovozero deposit with depth 2450 m, there is an increase in the concentrations of strontium, uranium, the Nb/Ta ratio and a decrease in the concentration of light and heavy rare earth elements and barium. The studies have shown that the change in the morphology of loparite (and the time of its crystallization) are geochemical criteria for the ore content of in the alkaline magmas for rare-metal raw materials (loparite ores). Ore-bearing zones for rare-metal raw materials of the giant Lovozero intrusion are only those that contain idiomorphic (cumulative) crystals of loparite. The lowest zone of the Lovozero intrusion, which is characterized by xenomorphic, interstitial grains of loparite (up to 870 m from the lower contact) is not promising for rare metal raw materials. Thus, a necessary condition for the appearance of magmatic rare-metal deposits of the cumulative type is the early cotectic saturation of the melt with respect to the ore mineral. In this case, the idiomorphic form of ore minerals is noted. If the concentration of the ore component is significantly lower than the cotectic one, then the crystallization of the ore mineral will be carried out at the late stages of rock formation in a small volume of interstitial melt, when the convective-gravitational differentiation and segregation of mineral phases are difficult, which will lead to the dispersion of ore components in the form of xenomorphic grains of accessory minerals.

Keywords: Eastern Fennoscandia, Lovozero rare metal deposit, loparite ores, REE, Nb, Ta