

УДК 553.21/24

НОВЫЙ ГЕОХИМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ РЕДКОМЕТАЛЬНОГО ОРУДЕНЕНИЯ ВЫСОКОЩЕЛОЧНЫХ МАГМ (ЛОВОЗЁРСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ, КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

Академик РАН Л. Н. Когарко

Поступило 12.02.2019 г.

Детальные исследования показали, что смена форм выделения эвдиалита (и времени его кристаллизации) представляет собой новый геохимический критерий рудоносности щелочных магм на редкометальное сырьё (эвдиалитовые руды). Сформулирован новый принцип рудоносности щелочных магм: необходимым условием формирования рудного месторождения является ранняя насыщенность щелочных магм в отношении рудного минерала. Если концентрация рудного компонента значительно ниже котектической (насыщения), то насыщение расплава и кристаллизация рудного минерала будут осуществляться на поздних стадиях формирования пород в малом объёме интерстициального расплава, когда явления конвективно-гравитационной дифференциации и сегрегации минеральных фаз в виде рудных залежей затруднены. Это приводит к рассеиванию рудных компонентов в виде ксеноморфных выделений акцессорных минералов. Породы дифференцированного комплекса (нижняя зона Ловозёрского месторождения), породы Хибинского массива, содержащие ксеноморфный эвдиалит, не перспективны на эвдиалитовые руды. Эвдиалитовые месторождения связаны с верхней зоной Ловозёрской интрузии, содержащей идиоморфный ранний эвдиалит. Насыщение исходной магмы в отношении эвдиалита происходит после кристаллизации около 80% интрузии. Предложенный критерий применим к крупнейшим щелочным массивам мира. В Иллимауссакском массиве (Гренландия), в породах которого кристаллизовался ранний, идиоморфный эвдиалит, присутствует суперкрупное месторождение эвдиалитовых руд, в то время как в Хибинском массиве и щелочном комплексе Пилансберг, породы которых содержат поздний ксеноморфный эвдиалит, месторождения этого типа отсутствуют.

Ключевые слова: Ловозёрское редкометальное месторождение, эвдиалитовая руда, формы выделения эвдиалита, насыщенность магмы эвдиалитом.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524874424-427>

Разработка геохимических критериев рудоносности природных магм является одной из важнейших задач современной геохимии. Успешное прогнозирование месторождений требует фундаментальных работ по установлению физико-химических параметров концентрирования рудного вещества. Поиск, разведка и в дальнейшем оценка запасов магматического рудного сырья тесно связаны с выяснением механизмов кумуляции рудных минеральных фаз в магматической камере и необходимых условий для формирования рудоносных тел и горизонтов.

Настоящая работа посвящена выяснению условий, благоприятных для возникновения месторождений кумулятивного типа, и разработке критериев рудоносности щелочных магм, с дифференциацией которых связаны крупнейшие месторождения редких земель, циркония, гафния, ниобия фосфора и других элементов. Потребление и цены на страте-

гические металлы значительно выросли в последнее десятилетие в связи с заметным расширением технологий, потребляющих эти металлы. В этой связи щелочные формации можно рассматривать как сырьё будущего — сырьё XXI в.

Самыми продуктивными формациями на стратегические металлы — REE, Zr, Hf, Nb, Ta, радиоактивные элементы — являются щелочные породы и карбонатиты, которые также относятся к ряду щелочных пород. Особый интерес представляют формации агапитовых нефелиновых сиенитов, к которым приурочены суперкрупные месторождения эвдиалита, лопарита и апатита (Кольский полуостров, Южная Африка, Бразилия, Гренландия). С гигантской Ловозёрской интрузией связаны редкометальные эвдиалитовые руды — ценнейший источник тяжёлых редких земель, циркония и гафния. Кроме того, эвдиалитовое месторождение поставяет комплексные руды, содержащие также марганец, ниобий, скандий, радиоактивные металлы и др.

Ловозёрский щелочной массив, расположенный в центральной части Кольского полуострова, занимает площадь в 650 км² и залегает среди архейских

*Институт геохимии и аналитической химии
им. В.И. Вернадского Российской Академии наук,
Москва*

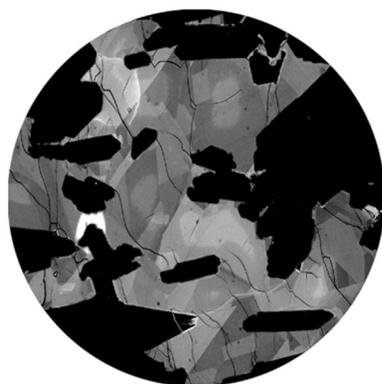
E-mail: kogarko@geokhi.ru

гранитогнейсов. Его возраст 360 ± 10 млн лет [1]. Согласно схеме В.И. Герасимовского и др. [2], Ловозёрский щелочной массив сформировался в три главные интрузивные фазы.

Нефелиновые и нозеановые сиениты I фазы встречаются в основном в виде ксенолитов. Дифференцированный комплекс (II интрузивная фаза) представляет собой ритмически слоистую мощную (свыше 1500 м) интрузию, сложенную закономерно чередующимися в вертикальном разрезе пластами нефелиновых сиенитов различного состава — урритами, фойяитами, лувявритами, состоящими в основном из нефелина, калиевого полевого шпата и эгирина. Для этих пород в целом характерно увеличение коэффициента агпаитности (средняя величина $K_{\text{агп}} = 1,41$) и появление типичных минералов агпаитового парагенезиса: лопарита, виллиомита, содалита, лампрофилита, рамзаита и др. Комплекс эвдиалитовых лувявритов (III фаза) — это пластообразная интрузия мощностью до 450–600 м, прорывающая и перекрывающая породы II фазы. Этот комплекс сложен слабонерасчлененной толщей эвдиалитовых лувявритов от лейко- до меланократовых, причём в породах верхних частей разреза возрастают содержания темноцветных минералов. Эвдиалитовые лувявриты отличаются наиболее высоким $K_{\text{агп}} = 1,50$ и максимальным содержанием ZrO_2 — 1,36 мас.%, а также ярко выраженным агпаитовым парагенезисом минералов, особенно в верхних горизонтах (мурманит—ломоносовит, лампрофилит, рамзаит, ловозерит). Эвдиалит в этих породах становится главным породообразующим минералом. Рудные горизонты, обогащённые эвдиалитом, располагаются в верхней зоне эвдиалитового комплекса, представленного эвдиалитовыми лувявритами. В самой верхней зоне в виде линз и слоёв развиты редкометальные руды — эвдиалититы, состоящие на 85–90% из эвдиалита. Таким образом, в верхней зоне эвдиалитовой интрузии содержание эвдиалита значительно возрастает, вследствие этого вся верхняя часть III интрузивной фазы представляет собой руду на редкие земли, цирконий и гафний.

Мы детально исследовали минералогию и геохимию агпаитовых щелочных пород в вертикальном разрезе Ловозёрского месторождения, особое внимание было уделено формам выделения и составу эвдиалита. Проведённые работы (до глубин 2200–2300 м общего разреза Ловозёрского массива) выявили целый ряд особенностей строения и минерального состава этой интрузии. Наиболее интересным является смена минеральных парагенезисов в исследуемой зоне. Набор породообразующих ми-

нералов — нефелин, калиевый полевой шпат и эгирин — не меняется, в то время как высокощелочные агпаитовые акцессорные минералы верхней части разреза — эвдиалит и лампрофилит — заменяются менее щелочными, близкими к миаскитовым ассоциациям (сфен, мозандритовая группа минералов и циркон) в наиболее глубинных, не выходящих на поверхность зонах дифференцированного комплекса Ловозёрского месторождения (скважины 904, 905 и др.). В этой части разреза эвдиалит отсутствует. На этих глубинах главными минералами-концентраторами циркония являются циркон и ловенит. При движении вверх по разрезу появляются циркониевые минералы — катаплеит, келдышит и (по нашим предварительным данным) армстронгит. С глубины порядка 2100 м в ассоциации нефелин-калиевый полевой шпат — эгирин появляется эвдиалит в ассоциации с паракелдышитом и минералами ловенитовой группы. Во всём интервале глубин дифференцированного комплекса начиная с 2100 м эвдиалит кристаллизуется на позднемагматическом этапе; он образует ксеноморфные выделения, приуроченные к интерстициям породообразующих минералов — нефелина, калиевого полевого шпата, эгирина и амфибола (рис. 1). Вверх по разрезу (на глубинах порядка 400 м) — в самых нижних зонах третьей интрузивной фазы эвдиалит становится ранним минералом, образует хорошо оформленные идиоморфные кристаллы (рис. 1). Формы выделения эвдиалита по идиоморфизму не отличаются от нефелина, полевого шпата, амфибола и эгирина, что указывает на их одновременную кристаллизацию на раннемагматической стадии. Таким образом, петрографические исследования показали, что смена форм выделения главного минерала-концентрактора циркония — эвдиалита определяется временем кристаллизации этого минерала. Как было показано нами [3] и другими авторами [4], формирование многих расслоенных интрузий происходит снизу вверх в результате оседания минералов в процессе кристаллизации и конвективного перемешивания. Однако в некоторых случаях часть кристаллизующихся минеральных фаз всплывает в магматической камере. Примером подобного процесса являются месторождения апатита Хибинского массива. Очень мелкие кристаллы апатита в процессе активной конвекции не оседают, а накапливаются в жидкости, и по мере остывания интрузии и заполнения магматической камеры кристаллическим осадком апатит вместе с жидкостью поднимается вверх, значительно концентрируется и формирует апатитовое месторождение. Интерстициальный характер эвдиалита во всём разрезе дифференцированного ком-



Ксеноморфный эвдиалит
в нижней зоне
Ловозёрского месторождения
(фото в отражённых электронах, $\times 10$)



Эвдиалитовый луюврит,
содержащий идиоморфный
эвдиалит
(фото в проходящем свете, $\times 2$)



Эвдиалитовая руда,
содержащая идиоморфный
эвдиалит
(фото в проходящем свете, $\times 4$)

Рис. 1. Эволюция форм кристаллизации эвдиалита в процессе дифференциации высокощелочной магмы Ловозёрского месторождения.

плекса Ловозёрской интрузии свидетельствует о том, что исходная магма не была насыщена в отношении эвдиалита. В целом на основании соотношений объёмов дифференцированного и эвдиалитового комплексов можно заключить, что только после кристаллизации около 85% всей интрузии состав остаточного расплава становился насыщенным в отношении эвдиалита и этот минерал становится ликвидусной минеральной фазой. Как ликвидусный минерал, эвдиалит выделялся на ранних этапах одновременно с главными породообразующими минералами — нефелином, эгирином, амфиболом и калиевым полевым шпатом. Наши экспериментальные данные фазовых равновесий в системе эвдиалит—нефелин [5] показали, что концентрация ZrO_2 в расплаве, насыщенном в отношении эвдиалита, составляет 1,5%. По данным Герасимовского и др. [2], среднее содержание ZrO_2 в породах дифференцированного комплекса составляет 0,29%. Учитывая эту величину и концентрацию насыщения щелочного расплава в отношении эвдиалита — 1,5% ZrO_2 , получаем очень близкую величину массы закристиализовавшегося магматического осадка — 81% выделившегося перед насыщением расплава эвдиалитом. Необходимо учитывать, что в процессе дифференциации щелочной магмы кристаллический осадок захватывал несколько процентов расплава, кроме того, цирконий активно концентрировался во фракционирующих пироксенах, содержание ZrO_2 в которых достигает иногда первых процентов. Вследствие этих причин количество кристаллического осадка для достижения концентраций окиси циркония в остаточном расплаве должно возрасти на несколько процентов для достижения насыщенности в отношении эвдиалита. Интересно отметить,

что смена форм выделения эвдиалита совпадает с внедрением новой порции щелочного расплава в малоглубинную магматическую камеру. Приповерхностный характер эвдиалитовых луювритов подтверждается широким развитием порфировидных луювритов, имеющих аналогичный состав и вулканическую структуру. Мы полагаем, что формирование эвдиалитового комплекса происходило при очень невысоких давлениях, что способствовало расширению поля кристаллизации эвдиалита и формированию эвдиалитовых руд главного сырья на тяжёлые редкие земли, цирконий и гафний. На основании приведённых фактов можно заключить, что смена форм выделения эвдиалита (и времени его кристаллизации) представляет собой новый геохимический критерий рудоносности щелочных магм на редкоэлементное сырьё (цирконий, гафний, тяжёлые редкие земли).

Из полученных данных следует, что рудоносными зонами гигантской Ловозёрской интрузии могут быть только те, которые содержат идиоморфный (кумулятивный) эвдиалит. Дифференцированный комплекс Ловозёрской интрузии (около 2300 м) не перспективен на этот тип редкометального сырья.

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 объёме интерстициального расплава, когда

явления конвективно-гравитационной дифференциации и сегрегации минеральных фаз затруднены, что приведёт к рассеиванию рудных компонентов в виде ксеноморфных выделений акцессорных минералов. Принцип ранней котектической насыщенности магмы в отношении рудного минерала как необходимое условие возникновения магматических руд кумулятивного типа может быть распространён на формации ультраосновных и основных пород. В качестве примера можно привести эвдиалитовое месторождение интрузии нефелиновых сиенитов Гренландии — комплекс Илимауссак, в породах которого эвдиалит представлен ранними идиоморфными выделениями, т.е. исходная магма была насыщена эвдиалитом на самых ранних стадиях. В массиве агапитовых нефелиновых сиенитов Пилансберг (Южная Африка) эвдиалит выделялся на более поздних стадиях, и в этом массиве эвдиалитовые руды отсутствуют. Исходный щелочной расплав Хибинского массива (Кольский полуостров) не был насыщен на ранних этапах в отношении эвдиалита, и, несмотря на довольно высокие содержания ZrO_2 , эвдиалитовые руды отсутствуют во всех интрузивных комплексах Хибинского массива.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президиума РАН № 8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kramm U., Kogarko L.* Nd and Sr Isotope Signatures of the Khibina and Lovozero Agpaitic Centers, Kola Alkaline Province, Russia // *Lithos.* 1994. V. 32. P. 225–242.
2. *Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Саприкина Т.В., Балашов Ю.А.* Геохимия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1966. 392 с.
3. *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 // *Mineral. and Petrol.* 2002. V. 74. P. 1–24.
4. *Parsons I.* Origin of Igneous Layering. Dordrecht: Reidel, 1987. 561 p.
5. *Когарко Л.Н., Лазуткина Л.Н., Кригман Л.Д.* Условия концентрирования циркония в магматических процессах. М.: Наука, 1988. 120 с.

NEW GEOCHEMICAL CRITERION OF RARE METAL MINERALIZATION IN THE PERALKALINE MAGMAS (LOVOZERO MINERAL DEPOSIT, KOLA PENINSULA)

Academician of the RAS L. N. Kogarko

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

Received February 12, 2019

Detailed studies have shown that changing the forms of eudialyte release (and the time of its crystallization) is a new geochemical criterion for the ore-bearing of alkaline magmas for rare metal (eudialyte ores). A new ore-bearing principle of alkaline magmas has been formulated: a prerequisite for the formation of an ore deposit is the early saturation of alkaline magmas with respect to the ore mineral. If the concentration of the ore component is significantly lower than the cotectic concentration (saturation), then the melt saturation and crystallization of the ore mineral will be carried out at the later stages of rock formation in a small volume of interstitial melt, when the phenomena of convective-gravity differentiation and segregation of mineral phases in the form of ore deposits are hampered. This leads to the dispersion of ore components in the form of xenomorphic forms of accessory minerals. Rocks of the differentiated complex (lower zone of the Lovozero deposit), and of the Khibiny massif, containing xenomorphic eudialyte, are not promising for eudialyte ores. Eudialyte deposits are associated with the upper zone of the Lovozero intrusion containing idiomorphic early eudialyte. The saturation of the initial magma in relation to eudialyte occurs after crystallization of about 80% of the intrusion. The proposed criterion is applicable to the largest alkaline massifs in the world. With the Ilimaussaksky massif (Greenland), in the rocks of which early, crystallized, idiomorphic eudialyte, there is a superlarge eudialyte ore deposit while in the Khibiny eudialyte ore is absent.

Keywords: rare metal deposits of Lovozero massif, eudialyte ore, morphology of eudialyte, eudialyte saturation of magma.