

ГЕОХИМИЯ СУПЕРКРУПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОЙ ФЕНОСКАНДИИ (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

© 2021 г. Л. Н. Когарко*

ГЕОХИ им. В.И. Вернадского, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

*e-mail: kogarko@geokhi.ru

Поступила в редакцию 10.05.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 18.05.2021 г.

Впервые обобщены материалы по геохимии трех суперкрупных редкометальных месторождений Восточной Феноскандии. На примере лопаритовых, эвдиалитовых и апатитовых руд Кольского полуострова показано, что необходимым условием формирования магматического месторождения должна быть ранняя насыщенность щелочной магмы в отношении рудной фазы. Важным фактором должна быть активная конвекция в магматической камере, которая вызывает сортировку по размерам минеральных фаз, что приводит к генезису магматических месторождений. Спектры редкоземельных металлов апатитовых, лопаритовых и эвдиалитовых руд не имеют европиевой аномалии, это показывает, что в процессе дифференциации первичных магм не было фракционирования плагиоклаза, который обладает высоким коэффициентом распределения европия. Состав первичной магмы этих месторождений близок к оливиновым меланефелинитам.

Ключевые слова: апатитовые, лопаритовые, эвдиалитовые руды, Ловозерское суперкрупное редкометальное месторождение, Хибинские апатитовые месторождения

DOI: 10.31857/S0016752521110042

Разработка геохимических критериев рудоносности природных магм является одной из важнейших задач современной геохимии. Поиск, разведка и, в дальнейшем, оценка запасов магматического рудного сырья тесно связаны с выяснением генезиса месторождений, а также вероятностью аккумуляции рудных минеральных фаз в период формирования рудоносных тел и горизонтов. Настоящая работа посвящена выяснению условий, благоприятных для возникновения магматических месторождений кумулятивного типа, и разработке критериев рудоносности щелочных магм, дифференциация которых привела к формированию суперкрупных редкометальных месторождений.

Среди магматических формаций мира щелочные породы характеризуются исключительной продуктивностью. С ними связаны крупнейшие месторождения фосфора, редких литофильных элементов, таких как цирконий, ниобий, редкие земли, стронций, уран, торий, алюминий. Потребление редких элементов в индустриально развитых странах непрерывно растет; в этой связи щелочные формации можно рассматривать как сырье будущего – сырье XXI века.

Особый интерес представляют формации апаитовых нефелиновых сиенитов, к которым

приурочены суперкрупные месторождения апатита, лопарита и эвдиалита (восточная Феноскандия, Кольский полуостров (рис. 1), Южная Африка, Бразилия, Гренландия). С гигантскими Ловозерской (рис. 2) и Хибинской интрузиями связаны редкометальные лопаритовые, эвдиалитовые и апатитовые руды, которые в настоящее время активно разрабатываются. Эти месторождения всегда привлекали внимание многих исследователей.

Эрик Михайлович Галимов также проявлял большой интерес к уникальным месторождениям Кольского полуострова. Его изотопные исследования углеводородных газов Ловозерского редкометального месторождения впервые показали их неорганическую природу. Изотопный состав углерода Ловозерских газов варьирует в пределах $\delta^{13}\text{C} = -0.32 \dots -1.28$. И близок к графитному углероду мантии, который находится в тех же пределах, что и углерод углистых хондритов ($\delta^{13}\text{C} = 0.37 \dots -0.57$) (Галимов, Петерилье, 1967). Наши более поздние исследования (Kogarko et al., 2009) показали, что источниками апатитовых, лопаритовых и эвдиалитовых руд является метасоматизированная мантия.

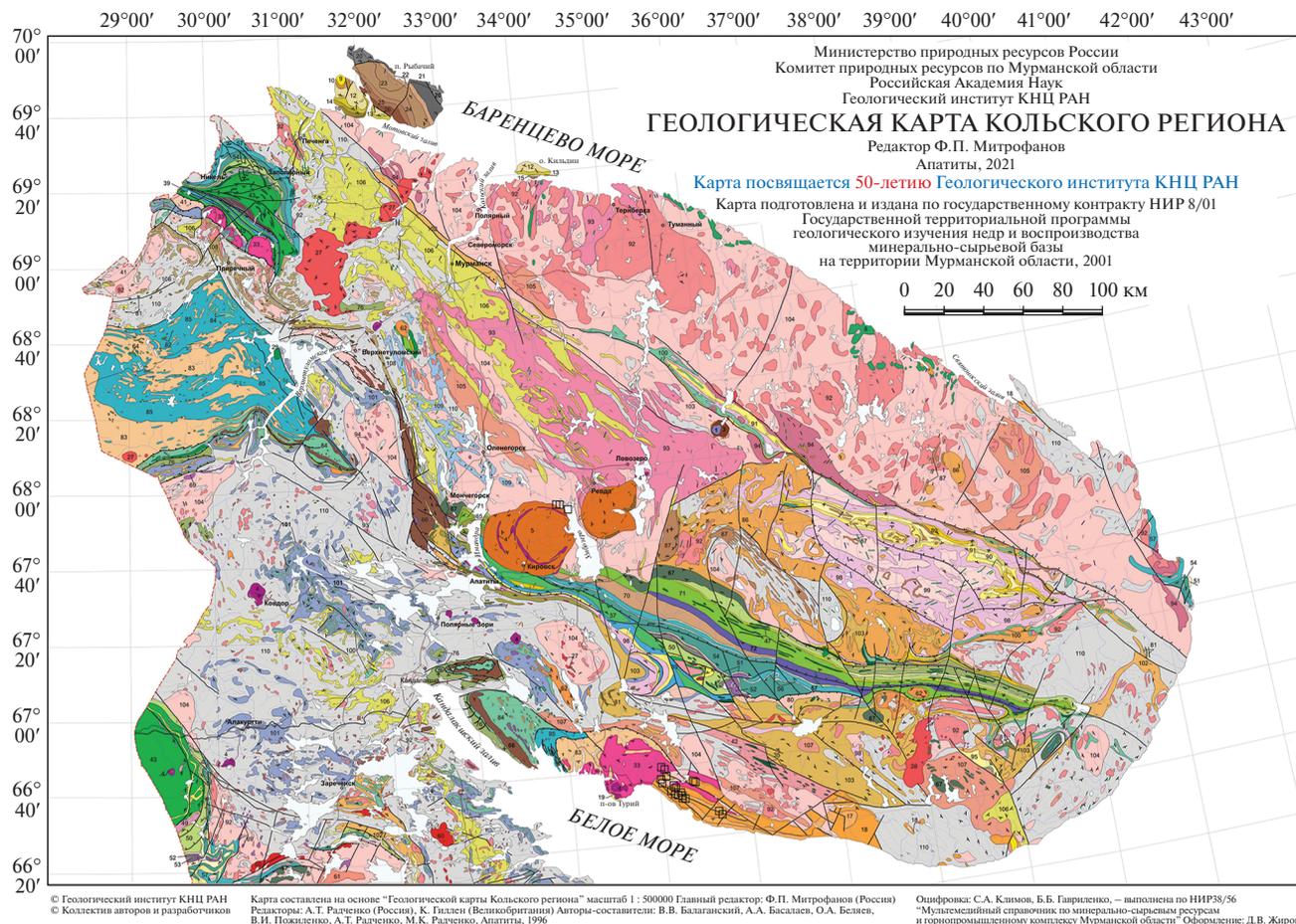


Рис. 1. Геологическая карта Кольского региона м-ба 1 : 500000 (ред. Митрофанова, 2001).

ГЕНЕЗИС АПАТИТО-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД ХИБИНСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Крупнейшим апатитовым месторождением мира, связанным с щелочными породами, являются Хибинские апатито-нефелиновые руды (рис. 2, 3) Кольского полуострова. В едином суперкрупном Хибинском месторождении выделяют ряд отдельных рудопроявлений (рис 2). Структура и геология месторождения показаны на рис. 2. Месторождение образует ийолит-уртитовую дугу (рис. 2), в основании которой залегают крупное тело массивных уртитов, на 85–90% состоящее из нефелина. Выше по разрезу увеличивается количество апатита и пироксена (рис. 3), образуя сетчатые, линзовидные руды. Еще выше по разрезу количество апатита возрастает, образуются полосчатые и сахаровидные руды богатые апатитом. Наши данные (Kramm, Kogarko, 1994) показали, что возраст пород и всех руд Хибинского массива аналогичен Ловозерской интрузии, а также лопаритовым и эвдиалитовым рудам — 370 Ма (Kogarko et al., 2009).

Около 900 зерен апатита были проанализированы из различных месторождений Хибинского массива.

Пробы были проанализированы в Институте геохимии и аналитической химии им. Вернадского РАН, Москва, а также в Минералогическом отделе Британского музея с помощью микроанализатора с электронным зондом CAMECA SX 100 (CAMECA) и CAMECA 50. Все стандарты получены из Смитсоновского института. Анализ микроэлементов проводился в университете Франкфурта и институте Макса Планка в Майнце с использованием Thermo Element 2 ICPMS (Thermo Fisher, Waltham, MA, USA).

Средние содержания редких элементов были получены для 4 месторождений Хибинского массива (Kogarko, 2018). Хибинский апатит содержит исключительно высокие содержания SrO (в среднем 4.5 мас. %), которые заметно варьируют в пределах 0.16–9.8 мас. % в разных месторождениях. Концентрация Sr в апатитах значительно выше содержания в исходном магматическом расплаве. (Зак и др., 1972). Апатит обладает высоким потенциалом редких земель в среднем 8900ppm с резким преобладанием легких редких земель (рис. 4). Мы исследовали состав апатита в вертикальном разрезе месторождения Расвумчорр. (глубина до 600 м). Несмотря на различия в концентрации Sr

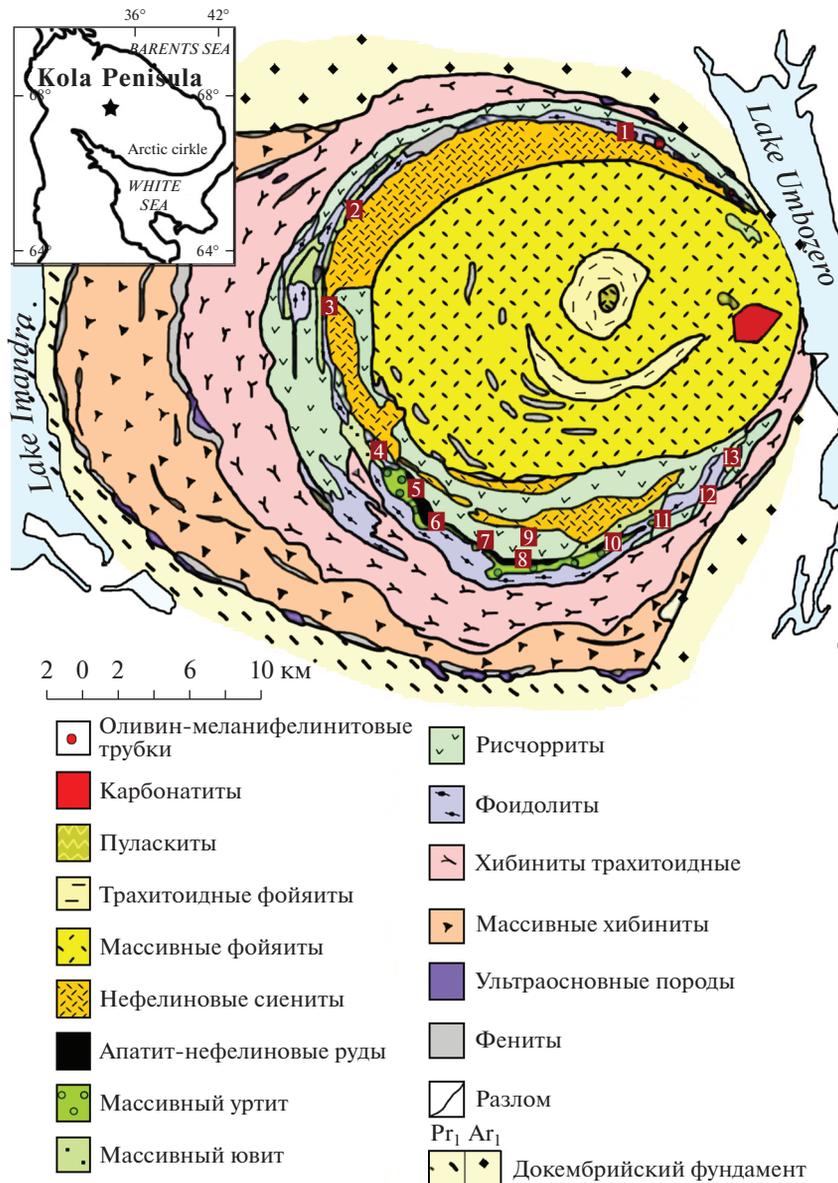


Рис. 2. Геологическая карта Хибинского массива обобщена по карте МГРЭ ПГО “Севзапгеология” (В. П. Павлов) [Арзамасцев и др., 2008] ■ – Титанит – апатитовые месторождения: 1 – Валепакх; 2 – Партемчорр; 3 – Куелпорр; 4 – снежный цирк; 5 – Кукисвумчорр; 6 – Юкспорр; 7 – апатитовый цирк; 8 – Расвумчорр; 9 – Эвеслогчорр; 10 – Коашва; 11 – Вуонемиок; 12 – Неркпакк; 13 – Олений Ручей (Kalashnikov et al., 2016).

в апатитах на одном уровне, наблюдается увеличение содержания Sr и PЗМ в апатите в вертикальном разрезе (рис. 5).

Одной из проблем которая активно обсуждалась в литературе, какой главный процесс был ответственным за формирование апатитовых руд.

Выдвигались идеи магматического, гидротермального и метасоматического генезиса апатитовых руд Хибин. Мы провели исследования микровключений в около 500 зернах апатитов различных руд. Микровключения обычно различных размеров и содержат главным образом кристаллы пироксена, нефелина, калиевого полевого шпата.

Кроме породообразующих минералов были обнаружены содалиты, титанит, амфибол титаномагнетит (рис. 6). Подобные включения гомогенизируются в алюмосиликатный расплав при температуре 700–1050°C. Эти данные однозначно говорят о магматическом генезисе апатитовых руд Хибинских месторождений. Результаты геологической съемки и детальные результаты бурения также подтверждают магматическую природу апатитовых месторождений (Зак и др., 1972). Микронзондовый анализ закаленных гомогенизированных включений показал, что алюмосиликатный расплав содержал около 2 мас. % P₂O₅

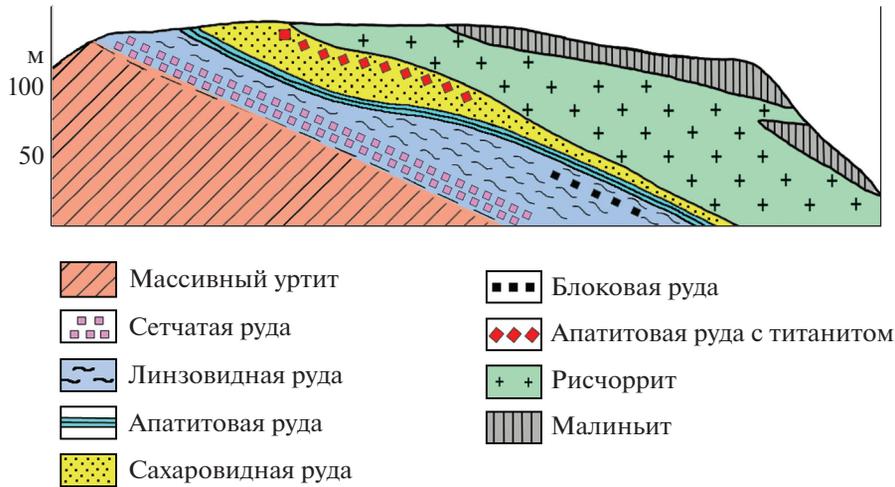


Рис. 3. Разрез месторождения апатитов Кукисвумчорр (Зак и др., 1972).

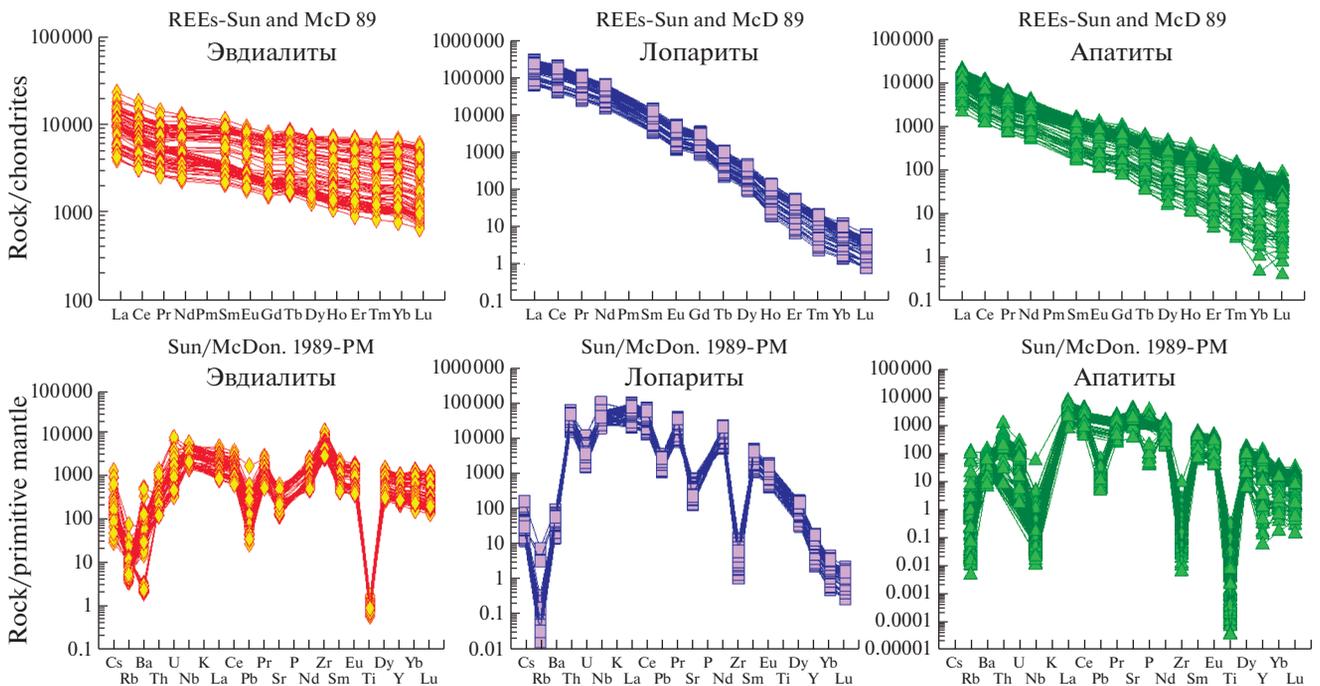


Рис. 4. Спектры редкоземельных металлов и редких элементов в апатитах Хибинских месторождений, лопаритах и эвдиалитах Ловозерского редкометалльного месторождения.

(Kogarko, 1996), эта величина близка к средней для всего апатито-нефелинового месторождения (Зак и др., 1972).

Фазовые равновесия апатитсодержащих иолит-уритовых пород Хибин можно рассмотреть в рамках системы $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaMgSi}_2\text{O}_6\text{-Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (рис. 7) (Kogarko, 1996). Средний состав апатитовой интрузии проектируется в поле нефелина. Из расплава такого состава нефелин кристаллизуется первым. Апатит и нефелин будут выделяться

при дальнейшем падении температуры. Апатит, нефелин и пироксен завершают кристаллизацию среднего состава апатитовой интрузии, которая повидимому имела исходный состав апатито-нефелиновой рудной фазы Хибинского массива. Последовательность кристаллизации минералов в экспериментальных исследованиях находится в согласии с петрографическими наблюдениями порядка кристаллизации пород).

Около 10–15% нефелина кристаллизуется до достижения нефелиновой апатит-пироксеновой

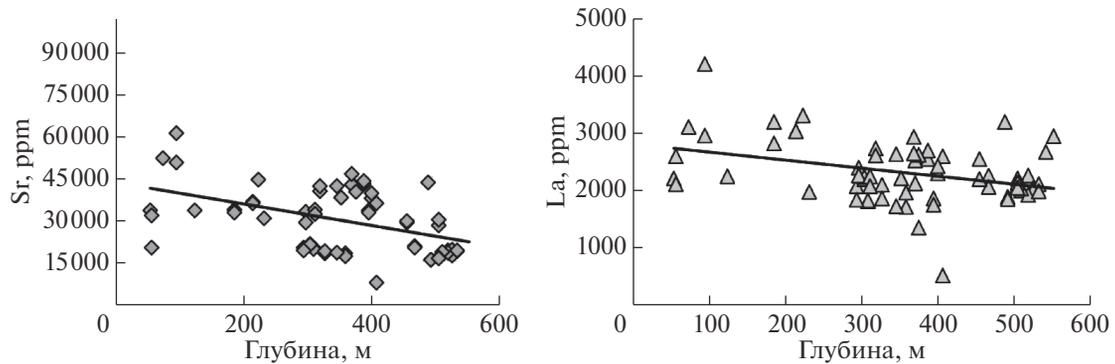


Рис. 5. Распределение Sr и La в вертикальном разрезе скважины месторождения Расвумчорр.

котектики, формируя подстилающий массивный уртит. Следует отметить, что поле существования двух жидкостей – фосфатной и алюмосиликатной отделен от среднего состава апатитовой интрузии температурным барьером. Это свидетельствует о том, что модель формирования апатитовых руд в результате несмесимости фосфатной и алюмосиликатной жидкости (Marakushev, Suk 1993; Елисеев, 1937) не является реалистичной. Кроме того, температура плавления мономинеральной апатитовой руды очень высокая и составляет около 1500°C .

Как было показано рядом авторов (Busa et al., 2002; Sawthorn, 1996; Tegner et al., 2006; Kogarko et al., 1986), конвективный режим должен существовать при мощности магматической камеры не менее 10 м. Выведенные уравнения конвективного перемешивания в магматическом очаге показывают, что наибольшее влияние на распределение минеральных частиц оказывает их размер; а не плотность (Bartlet, 1969). Нефелин (3–5 мм) и минеральные частицы крупнее нефелина оседают на дно магматической камеры, образуя нижний мощный слой (массивный уртит), в то время как более мелкие частицы – апатита (размером несколько десятых мм) не оседают, а вместе с жидкостью поднимаются в верхние зоны апатитовой интрузии формируя богатые сахаровидные апатитовые руды. Очень важным является наличие сортировки минералов (Kogarko, 1996; Arzamastsev et al., 2001), в рудах и массивных уртитах, что свидетельствует о том, что механизм накопления минералов и образование апатитовых руд явилось результатом гравитационной дифференциации в условиях конвективного движения. При образовании массивных уртитов очень небольшие кристаллы апатита были захвачены интерстициальным расплавом. В шлифе массивного подстилающего уррита (рис. 8) видна значительная разница в размерах этих минералов на ранних стадиях кристаллизации. Таким образом, активная конвекция в магматической камере неизбежно при-

ведет к разделению минералов, обладающих максимальной разницей размеров.

Апатит будет всплывать образуя руду, а нефелин погружаться на дно магматической камеры формируя массивный уртит-руду на алюминий. Композиционная эволюция Хибинского апатита в вертикальном разрезе интрузии (рис. 5) отражает первичные процессы фракционирования в щелочной магме, которая эволюционирует на месте от нижней зоны к вершине магматической камеры в результате магматической конвекции, в сочетании с осаждением минералов с различной скоростью оседания. Важным фактором является насыщенность исходной магмы апатитом (концентрация насыщения – 2% P_2O_5)

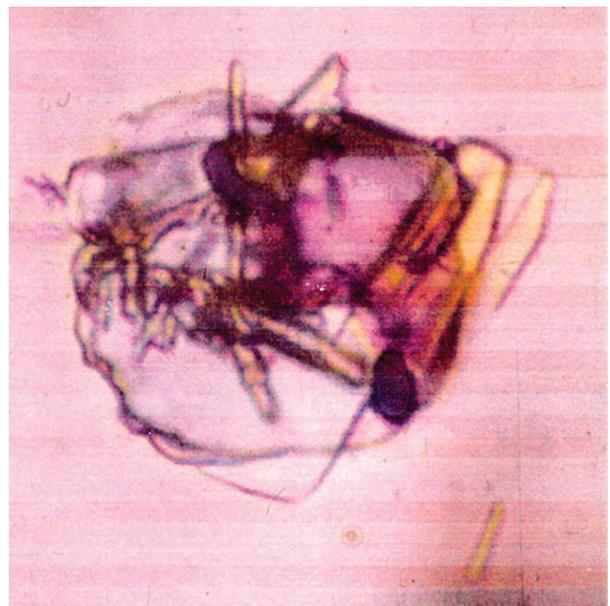


Рис. 6. Фотография микровключения в апатите сахаровидной руды X110, без анализатора. (Включение содержит нефелин, пироксен, калиевый полевой шпат, содалит, магнетит).

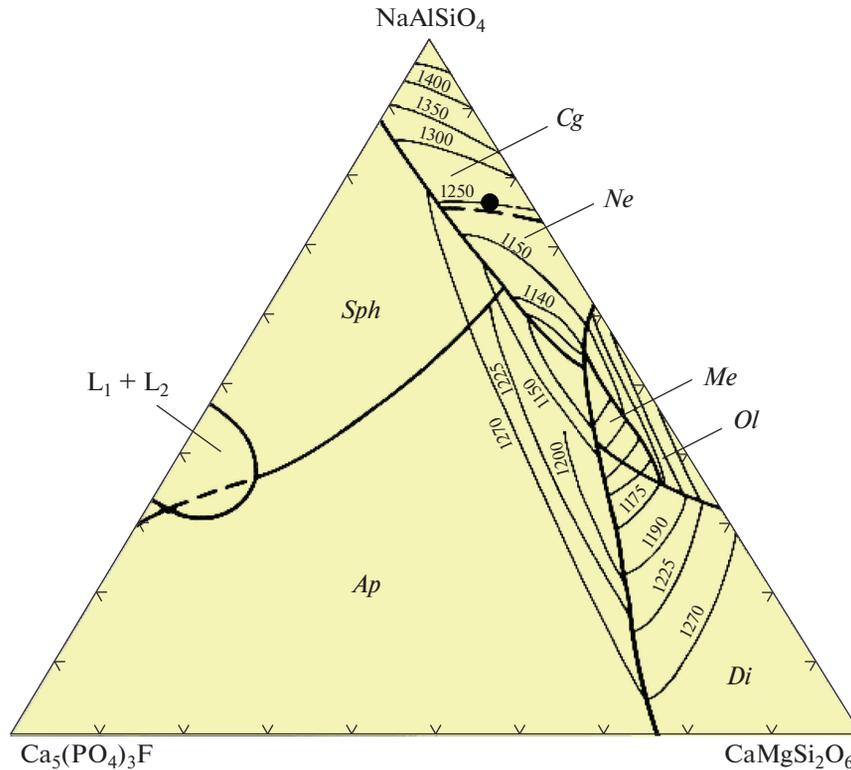


Рис. 7. Фазовые соотношения в системе $\text{NaAlSiO}_4\text{--CaMgSi}_2\text{O}_6\text{--Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ при 1 атм. давлении (Kogarko, 1977). Cg – карнегиит, Ne – нефелин, Ol – оливин, Me – мелелит, Di – диопсид, Ap – Апатит, в Sph – силикофосфат, $L_1 + L_2$ – две несмешивающихся жидкости, ● – средний состав Апатит-нефелиновой интрузии.

Наши данные свидетельствуют о том, что основным механизмом формирования апатит-нефелиновых руд было оседание крупных кристаллов нефелина в нижней части, в то время как очень маленькие кристаллы апатита в виде суспензии в конвективной магме вместе с расплавом концентрировались в верхней части магматической камеры.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОПАРИТОВЫХ РУД

Суперкрупное месторождение лопарита (рис. 9) связано с Ловозерской интрузией (Кольский полуостров).

Ловозерский массив (625 км^2) (рис. 10) представляет собой pluton, сформированный тремя интрузивными фазами: 1 фаза – среднезернистые нефелиновые и гидронозеановые сиениты, 2 – Дифференцированный комплекс (2 фаза) уртитов-фойяитов-луявритов, 3 фаза – эвдиалитовые луйавриты, с которыми связаны эвдиалитовые руды, залегающие в самых верхних зонах Ловозерского месторождения. Лопаритовые руды приурочены к отдельным горизонтам Дифференцированного комплекса. Лопаритовые руды связаны в

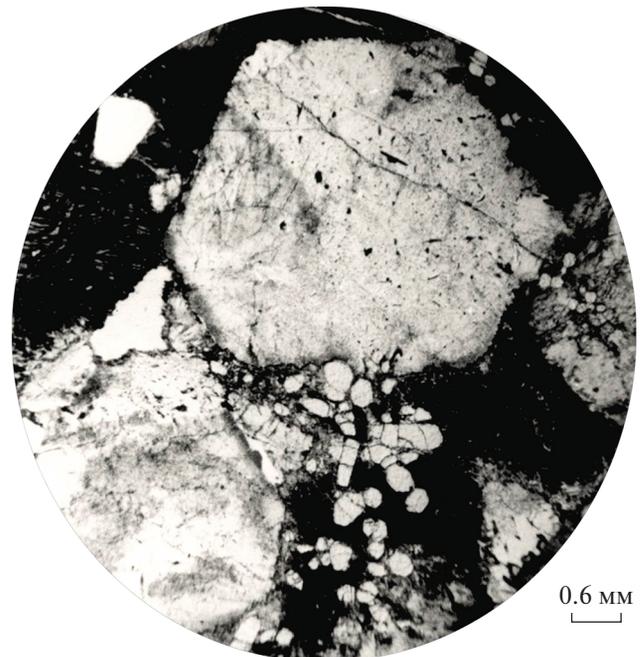


Рис. 8. Фотография шлифа массивного уррита. Мелкие кристаллы апатита в интерстиции между крупными кристаллами нефелина. X120, без анализатора.

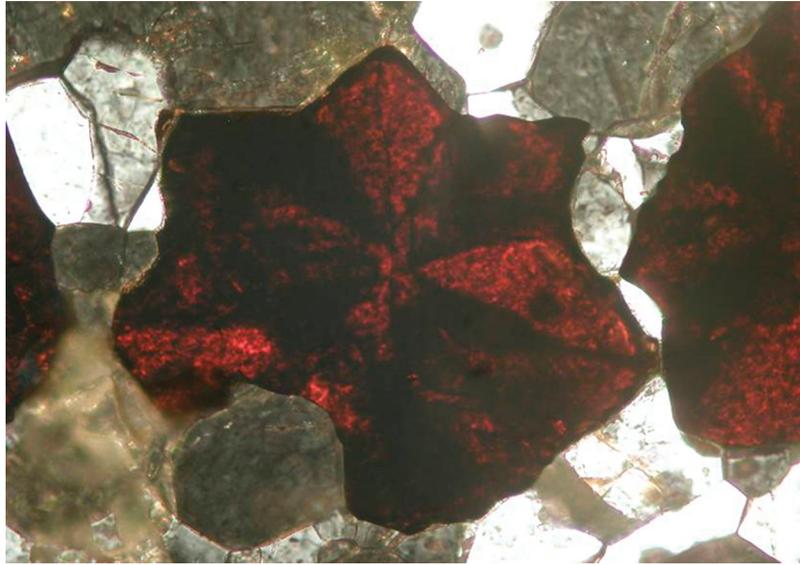


Рис. 9. Фото лопарита без анализатора X 45.

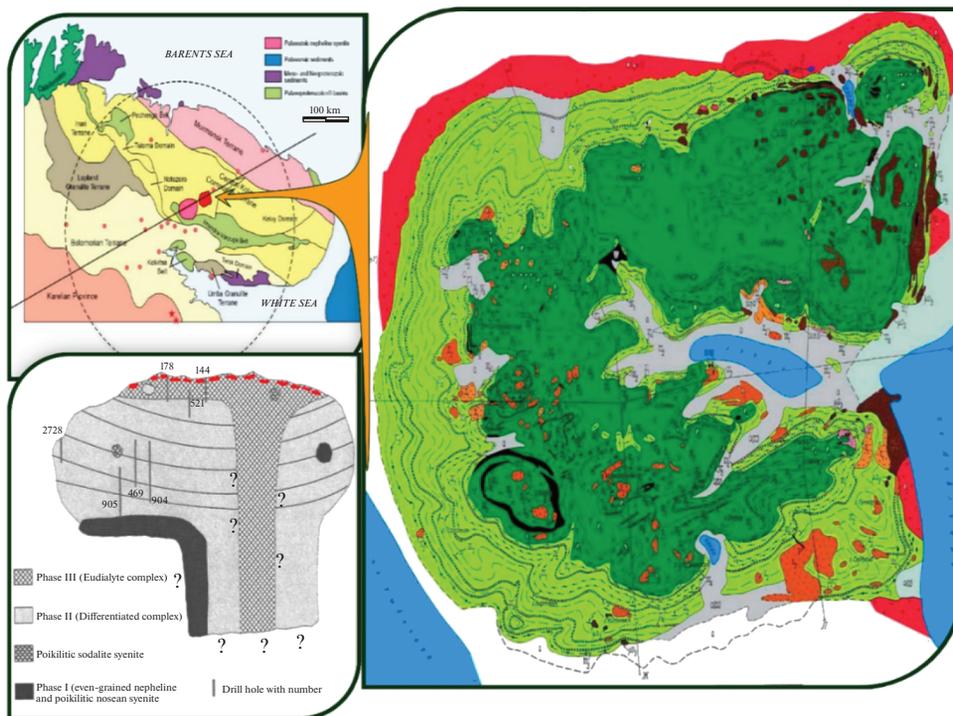


Рис. 10. Геологическая карта Ловозерского массива (Герасимовский и др., 1966).

основном с уртитовыми горизонтами. Рудные горизонты, обогащенные лопаритом, прослеживаются до глубин 2700 м. (расстояние от нижнего контакта — 800 м) Дифференцированного комплекса (11). Ниже по разрезу лопарит встречается как акцессорный минерал.

В течении последних лет мы детально исследовали минералогию и геохимию щелочных пород

наиболее глубоких, не выходящих на поверхность Дифференцированного комплекса Ловозерского массива (скважины 904, 905 и др.). Проведенные работы (до глубин 2200–2300 м общего разреза Ловозерского массива) выявили целый ряд особенностей строения и минерального состава этой интрузии. Наиболее интересным является смена форм выделения лопарита в вертикаль-

Комплекс	Зона	Глубина, м	Разрез	Минералы, горные породы
Комплекс эвдиалитовые луювриты		450		Нефелин, микроклин, эгирин, арфведсонит, эвдиалит, лейкократовые, мезократовые, меланократовые, эвдиалитовые луювриты. Акцессорные минералы: лампрофилит, пироклор, содалит, лопарит.
Дифференцированный комплекс	Верхняя зона	400		Нефелин, микроклин, эгирин, арфведсонит, эвдиалит, рудные лопаритовые уртиты. Акцессорные минералы: лопарит, эвдиалит, лампрофилит, мурманит.
	Средняя зона	600		Нефелин, микроклин, эгирин, арфведсонит, эвдиалит. Акцессорные минералы: лампрофилит, апатит, эвдиалит, мурманит-ломоносовит, мозандритовая группа, лопарит.
	Нижняя зона	450		Нефелин, микроклин, эгирин, арфведсонит, рудные лопаритовые уртиты и луювриты. Акцессорные минералы: лоренсинит, ильменит, апатит, содалит, титанит, лампрофилит, лопарит.
	Самая нижняя зона	800		Нефелин, К–Na полевой шпат, диопсид, арфведсонит. Акцессорные минералы: апатиты, титанит, мозандритовая группа, нозеан, ильменит, паракельдишит, лопариты.

Рис. 11. Вертикальный разрез Ловозерского месторождения.

ном разрезе Дифференцированного комплекса. В наиболее глубинной зоне массива лопарит образует ксеноморфные выделения, приуроченные к интерстициям (рис. 13), в то время как с глубины (800 м от нижнего контакта) лопарит становится хорошо оформленным, идиоморфным (рис. 12). Смена

форм выделения лопарита определяется временем кристаллизации этого минерала. Как было показано нами (2) и другими авторами (3) формирование расслоенных интрузий часто происходит снизу-вверх в результате оседания минералов в процессе кристаллизации и конвективного пере-

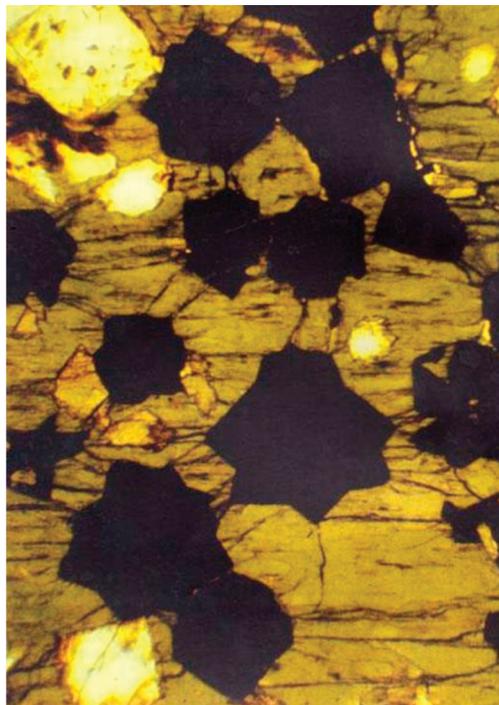


Рис. 12. Фотография шлифа лопаритовой руды X120 без анализатора.

мешивания. Интерстициальный характер лопарита в самой нижней зоне Ловозерской интрузии свидетельствует о том, что исходная магма дифференцированного комплекса Ловозерского массива не была насыщена в отношении лопарита. В этой части интрузии лопарит выделялся на более поздних стадиях, насыщение расплава в отношении лопарита достигалось после формирова-

ния каркаса из породообразующих минералов в небольших объемах интерстициальной жидкости, когда конвекция отсутствует и сегрегация лопарита в рудные горизонты затруднена. В следствии этого самая нижняя зона Ловозерской интрузии (ниже 800 м) не рудоносна на лопарит. Этот минерал рассеивается, не образуя рудных скоплений.

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 конвектирующего расплава и сегрегации в отдельных горизонтах в результате процессов гравитационно-конвективной дифференциации. Интересно отметить, что смена форм выделения лопарита (800 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 800-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 Ловозерской интрузии могут быть только те, которые содержат ранний идиоморфный (кумулятивный) лопарит.

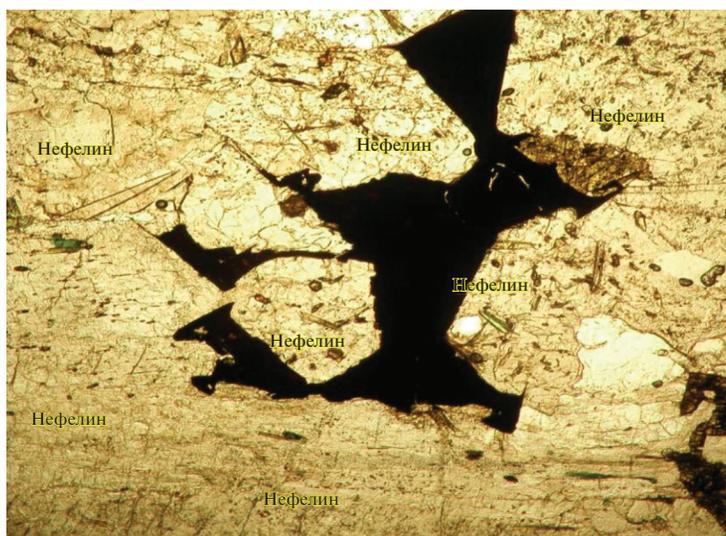


Рис. 13. Фотография ксеноморфного лопарита X110 без анализатора. Лопарит интерстициальный (лопарит – коричневый).

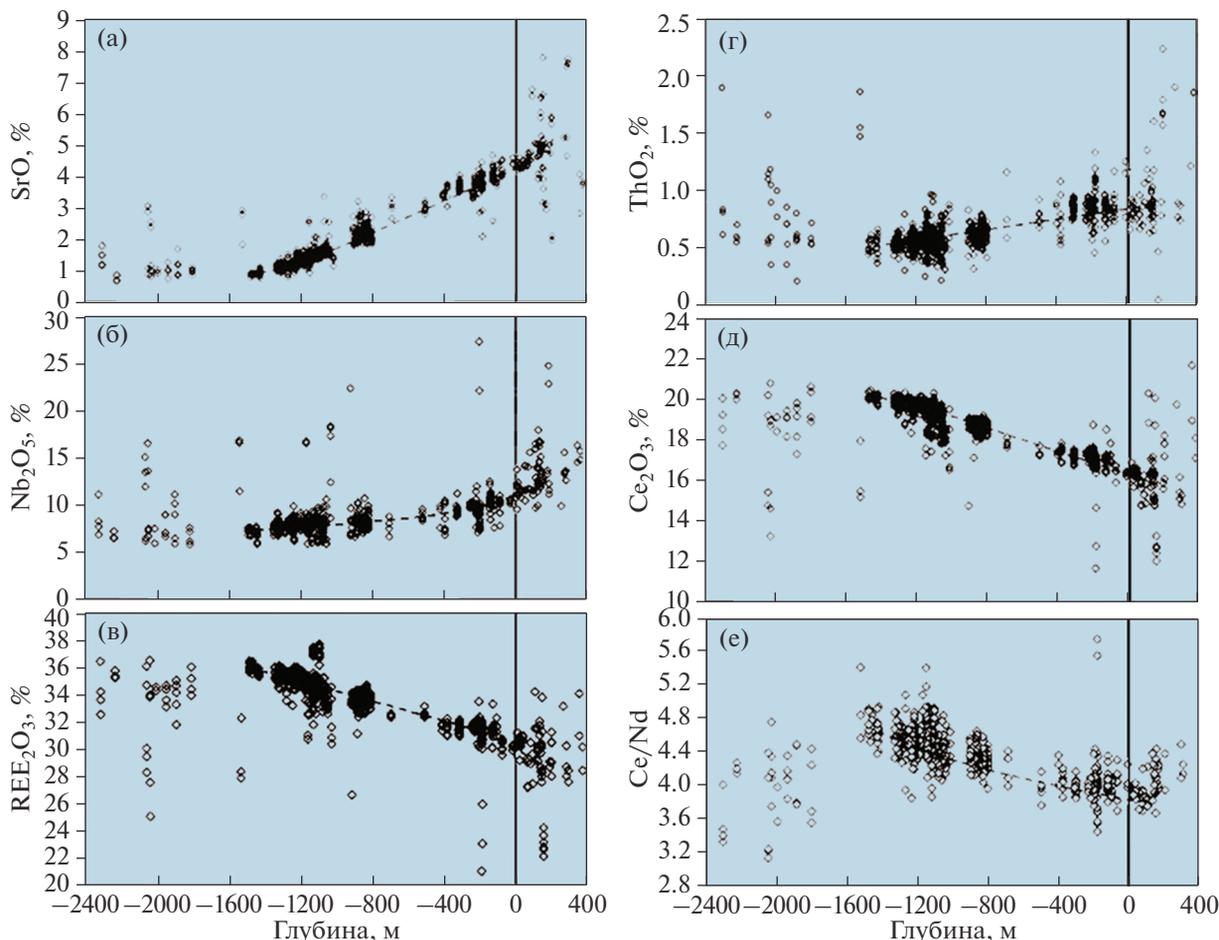


Рис. 14. Распределение REE_2O_3 , Nb_2O_5 , SrO , ThO_2 , Ce_2O_3 , Ce/Nd в вертикальном разрезе дифференцированного комплекса Ловозерского месторождения.

Нами было проанализировано методом ICPMS около 600 зерен лопарита из зоны кристаллизации идиоморфного лопарита. С глубины 800 м от нижнего контакта. Стратиграфически вверх по разрезу интрузии кумулюсный лопарит обогащается Sr, Nb, Ta, Th (рис. 14, табл. 1) (Kogarko et al., 2002) и обедняется Ca, Fe, Ti, суммарно REE. Это основной тренд эволюции кумулюсного лопарита в Ловозерском месторождении, наблюдаемый на 1600 м интрузии. Таким образом наиболее перспективны лопариты на редкие земли располагаются в нижней зоне, а стронций, ниобий, натрий, радиоактивные элементы накапливаются в лопаритах верхних зон Ловозерской интрузии.

Кумулюсный лопарит является основным минералом-хозяином для REE в Ловозерской щелочной магме, особенно в дифференцированном комплексе. Коэффициент распределения REE, Sr, Nb, Ta, Th в равновесии лопарит-щелочной расплав составляет 22, 6, 100–150, 80, 85, 133 (Kogarko et al., 2002).

Из полученных данных следует, что рудоносными зонами гигантской Ловозерской интрузии могут быть только те, которые содержат ранний идиоморфный (кумулятивный) лопарит. Самая нижняя зона Ловозерской интрузии (около 800 м) не перспективна на лопаритовое редкометальное сырье.

Таким образом необходимым условием появления магматических редкометальных месторождений кумулятивного типа является ранняя котектическая насыщенность расплава в отноше-

Таблица 1. Средний состав лопарита Ловозерского месторождения.

Na_2O	CaO	TiO_2	FeO	SrO	Y_2O_3	Nb_2O_5	BaO	La_2O_3	Ce_2O_3	Pr_2O_3	Nd_2O_3	Sm_2O_3	Ta_2O_5	ThO_2	UO_2	Сумма
8.73	4.75	40.9	0.29	1.17	<0.02	6.61	0.39	9.1	19.65	1.76	4.53	0.24	0.51	0.44	0.25	99.33

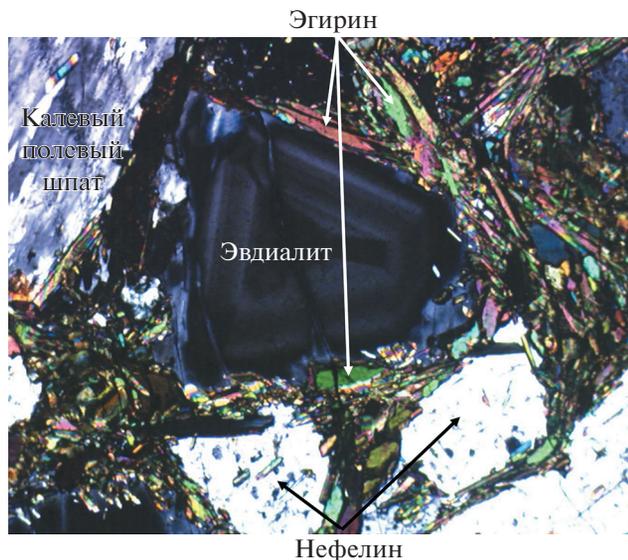


Рис. 15. Кристалл эвдиалита из рудной зоны $\times 30$.

нии 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. Принцип ранней котектической насыщенности магмы в отношении рудного минерала как необходимое условие возникновения магматических руд кумулятивного типа может быть распространен на формации ультраосновных и основных формаций. Процессы гравитации и конвективного перемешивания, сопряженные с накоплением магматического осадка на дне интрузии и химической эволюцией щелочного расплава являются главными механизмами формирования магматических руд.

Условия формирования эвдиалитового оруденения Ловозерского месторождения и критерии поисков руд, редких земель циркония и гафния.

Вторым суперкрупным редкометальным месторождением Ловозерского массива являются эвдиалитовые руды — ценнейший источник тяжелых редких земель, циркония и гафния (рис. 4, 15, табл. 2). Кроме того, эвдиалитовое месторожде-

ние является комплексным и руды содержат помимо редких земель, циркония и гафния также марганец, ниобий, скандий, радиоактивные металлы и др.

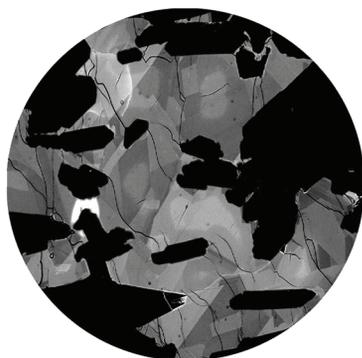
Эвдиалитовые луявриты отличаются наиболее высоким $K_{\text{апп}} - 1.50$ и максимальным содержанием $ZrO_2 - 1.36$ мас. %, а также ярко выраженным агапитовым парагенезисом минералов, особенно в верхних горизонтах (мурманит—ломоносовит, лампрофиллит, рамзаит, ловозерит). Эвдиалит в этих породах становится главным породообразующим минералом. Рудные горизонты, обогащенные эвдиалитом, располагаются в верхней зоне эвдиалитового комплекса, представленного эвдиалитовыми луявритами. В самой верхней зоне в виде линз и слоев, развиты редкометальные руды-эвдиалититы, состоящие на 85–90% из эвдиалита. Таким образом, в верхней зоне эвдиалитовой интрузии содержание эвдиалита значительно возрастает, в следствии этого вся верхняя часть 3 интрузивной фазы представляет собой руду на комплексное редкометальное сырье.

Мы детально исследовали минералогию и геохимию агапитовых щелочных пород в вертикальном разрезе Ловозерского массива, особое внимание было уделено формам выделения и составу эвдиалита. Проведенные работы (до глубин 2500–2700 м общего разреза Ловозерского массива) выявили целый ряд особенностей строения и минерального состава этой интрузии.

Наиболее интересным является смена минеральных парагенезисов в вертикальном разрезе. Набор породообразующих минералов — нефелин, калиевый полевой шпат и эгиринов не меняется, в то время как высокощелочные агапитовые акцессорные минералы верхней части разреза — эвдиалит и лампрофиллит — заменяются в более глубоких частях интрузии менее щелочными, близкими к миаскитовым ассоциациями (сфен, мозандритовая группа минералов и циркон) в наиболее глубоких, не выходящих на поверхность зонах дифференцированного комплекса Ловозерского 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-эгиринов появляется эвдиалит в ассоциации с паракелдышитом и минералами ло-

Table 2. Средний состав эвдиалита Ловозерского месторождения

Na ₂ O	SiO ₂	CaO	Cl	ZrO ₂	HfO ₂	TiO ₂	MnO	FeO	SrO	Nb ₂ O ₅	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Сумма
16.24	49.49	8.28	1.43	14.28	0.3	0.63	1.86	3.42	0.83	0.76	0.69	0.36	0.71	0.43	99.71



Ксеноморфный эвдиалит
в нижней зоне
Ловозерского месторождения
(фото в отраженных электронах, $\times 10$)



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



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

Рис. 16. Эволюция форм кристаллизации эвдиалита в процессе дифференциации высокощелочной магмы Ловозерского месторождения.

венитовой группы. Во всем 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. 16). В верх по разрезу (на глубинах порядка 400 м) – в самых нижних зонах третьей интрузивной фазы, эвдиалит становится ранним минералом, образует хорошо оформленные, идиоморфные кристаллы (рис. 16). 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 концентратора циркония – эвдиалита определяется временем кристаллизации этого минерала.

Интерстициальный характер эвдиалита во всем разрезе дифференцированного комплекса Ловозерской интрузии свидетельствует о том, что исходная магма не была насыщена в отношении эвдиалита и этот минерал рассеивался, не образуя скоплений. В целом на основании соотношений объемов 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 (Когарко, Роман-

чев, 1986) показали, что концентрация ZrO_2 в расплаве, насыщенном в отношении эвдиалита, составляет 1.5%. Близкая величина – 1.4% ZrO_2 была получена при анализе сгомогенизированного включения из рудного эвдиалита (рис. 17) (Когарко, Романчев, 1986).

Среднее содержание ZrO_2 в породах дифференцированного комплекса составляет 0.29%. Учитывая эту величину и концентрацию насыщенного щелочного расплава в отношении эвдиалита – 1.5% ZrO_2 , получаем очень близкую величину массы закристаллизовавшегося магматического осадка – 81% выделившегося перед насыщением расплава эвдиалитом. На основании приведенных фактов можно заключить, что смена форм выделения эвдиалита (и времени его кристаллизации) представляет собой геохимический критерий рудоносности щелочных магм на редкоэлементное сырье (цирконий, гафний тяжелые редкие земли).

Из полученных данных следует, что рудоносными зонами гигантской Ловозерской интрузии могут быть только те, которые содержат идиоморфный (кумулятивный) эвдиалит. Дифференцированный комплекс Ловозерской интрузии (около 2300 м) не перспективен на этот тип редкометального сырья. Хибинский щелочной комплекс, содержащий только поздний интерстициальный эвдиалит также не перспективен на эвдиалитовое оруденение. Крупное эвдиалитовое месторождение в Гренландии-Илимауссак характеризуется чередованием горизонтов, состоящих из ранних идиоморфных эвдиалитов и породообразующих минералов.

Интересной особенностью Ловозерского эвдиалита является высокая концентрация тяжелых редких земель (рис. 4). Это определяет высокую



Рис. 17. Микровключение в рудном эвдиалите. Микровключение содержит энigmatит, нефелин, пироксен, лампрофиллитамфибол. Температура гомогенизации 1050°C в алюмосиликатный расплав. Содержание ZrO_2 в закаленном стекле – 1.4%.

ценность эвдиалитовых руд, так как группа Y редких земель заметно дороже Се 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.

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ЭВДИАЛИТОВЫХ РУД

Проведенные нами детальные исследования состава эвдиалитовых зерен эвдиалитовых руд показали, что многие кристаллы представляют собой слипшиеся мелкие выделения, иногда со следами поломки (рис. 18). Это связано, по всей вероятности, с всплыванием более мелких кристаллов в верхние части магматической камеры в результате конвективного перемешивания. В кристаллических скоплениях происходит поломка отдельных кристаллов. Исследование порфировидных эвдиалитовых лувяритов, которые являются результатом быстрой закалки и содержат много мелких эвдиалитов (рис. 19) по размерам близким к наиболее ранним кристаллам. Размер подобных кристаллов составляет сотые мм даже слабое конвективное перемешивание будет вызывать всплывание очень мелких и нано-размерных частиц в верхние зоны магматической камеры.

Дальнейшая перекристаллизация будет приводить к росту кристаллов эвдиалитовой руды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные детальные геолого-геохимические исследования суперкрупных редкометалльных месторождений Кольского полуострова (Хибинские апатито-нефелиновые руды, лопаритовые и эвдиалитовые месторождения Ловозерского мас-



Рис. 18. Фотография в отраженных электронах, кристалла эвдиалита из рудного эвдиалита состоящего из мелко-частично-поломанных кристаллов эвдиалита (увеличение $\times 20$).

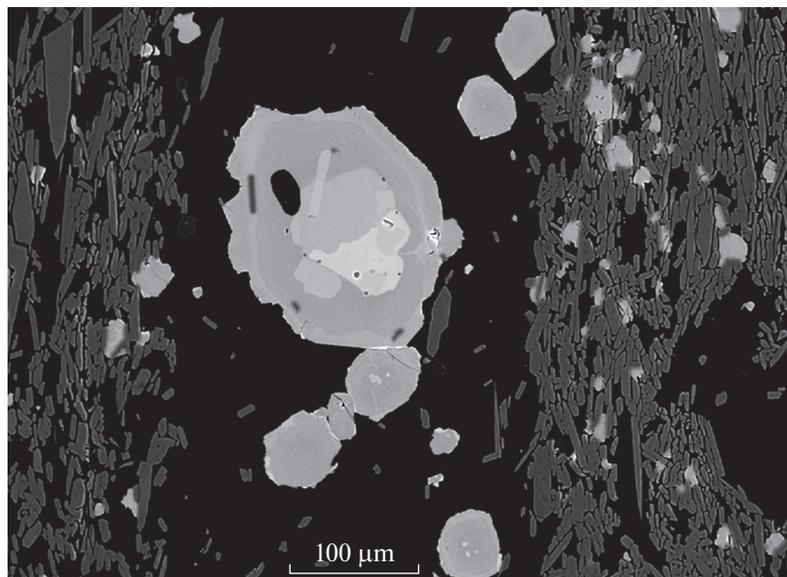


Рис. 19. Фотография в отраженных электронах шлифа порфириовидного эвдиалитового лопарита. Светлые кристаллы представлены эвдиалитами. Серые игольчатые кристаллы-пироксены. Темные области представлены нефелинами и калиевыми полевыми шпатами.

сива) позволили разработать геохимические модели их формирования и установить условия возникновения магматических руд. Лопаритовые месторождения формируются в процессе эволюции щелочной магмы. После кристаллизации около 30% ловозерской интрузии исходная магма становится насыщенной в отношении лопарита, который становится ранней идиоморфной хорошо оформленной минеральной фазой. Лопарит, активно участвует в процессах конвективного перемешивания, в результате которого формируются рудные лопаритовые горизонты. Лопарит как более тяжелая фаза по сравнению с породообразующими минералами концентрируется в нижней зоне ритмично повторяющихся горизонтов. В нерудной нижней зоне лопарит кристаллизуется на поздних стадиях образует ксеноморфные выделения и рассеивается не концентрируясь в отдельных горизонтах.

Механизм формирования эвдиалитовых руд также тесно связан с насыщением щелочной магмы рудным минералом. Нижняя часть Ловозерской интрузии (Дифференцированный комплекс) не насыщена в отношении эвдиалита и эвдиалит кристаллизуется на поздних стадиях в виде интерстициальных выделений. И только в 400 м от верхнего контакта эвдиалит становится ранним минералом, идиоморфным, хорошо оформленным и именно с этой зоной связано формирование эвдиалитовых руд.

Таким образом изменение форм кристаллизации рудных минералов является прогнозным критерием рудоносности щелочных пород. Инте-

ресной особенностью эвдиалитового месторождения является концентрация кристаллов эвдиалита в самых верхних частях Ловозерского месторождения. Мы полагаем, что в условиях активной конвекции самые мелкие кристаллы эвдиалита не тонут, а всплывали в верхние зоны, формируя эвдиалитовую практически мономинеральную руду.

Аналогичный процесс формирования мономинеральной апатитовой руды, по всей вероятности, также было следствием конвективной активности, которая вызвала всплывание мелких зерен апатита и оседание крупных кристаллов нефелина, в результате чего возник массивный уртит и богатая апатитовая руда. Исходный состав апатитоносной интрузии был насыщен апатитом. Это подтверждается экспериментальными данными системы апатит-нефелин-диопсид и исследованиями микровключений.

Таким образом необходимым условием формирования магматического месторождения должна быть ранняя котектическая насыщенность щелочной магмы в отношении рудной фазы. Вторым важным фактором должна быть активная конвекция в магматической камере, которая вызывает сортировку по размерам минеральных фаз, что приводит к генезису магматических месторождений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (Соглашение № 750-15-2020-802) "Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арзамасцев А.А., Яковенчук В.Н., Пахомовский Ю.А., Иванюк Г.Ю. (2008) Хибинь и Ловозеро щелочные Массивы: Геология и уникальное оруденение; 33 экскурсии ИГС, 47; геологический институт Российской академии наук Изд-во Апатиты, Россия.
- Галимов Э.М., Петерсилье И.А. (1967) Об изотопном составе углерода, углеводородных газов и CO₂, содержащихся в щелочных изверженных породах Хибинского, Ловозерского и Иллимауссакского массивов. *Докл. АН СССР* **176**(4), 914-917.
- Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Саприкина Т.В., Балашов Ю.А. (1966) *Геохимия Ловозерского щелочного массива*. М.: Наука. 398 с.
- Елисеев Н.А. (1937) Хибинские апатитовые месторождения. *Записки Всерос. минерал. о-ва* **LXVI**(3), с. 491-516.
- Зак С.И., Каменев Е.А., Минаков Ф.В., Арманд А.Л., Михеичев А.С., Петерсилье И.А. (1972) *Щелочной Хибинский массив*. Л.: Недра. 176 с.
- Когарко Л.Н., Романчев Б.П. (1986) Геохимический критерий рудоносности щелочных магм. *Геохимия* **10**, 1423-1430.
- Митрофанов Ф.П. (2001) Геологическая карта Кольского полуострова. Масштаб 1 : 2000000. 2001 г. Редактор Ф.П. Митрофанов / Министерство природных ресурсов России. Комитет природных ресурсов по Мурманской области / Российская академия наук. Геологический институт КНЦ РАН.
- Arzamastsev A.A., Bea F., Glaznev V.N., Arzamastseva L.V., Montero P. (2001) Kola alkaline province in the Paleozoic: evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions. *Russian Journal of Earth Sciences*, **3**, 1-32.
- Bartlett R.W. (1969) Magma convection, temperature distribution and differentiation. *Am. J. Sci.* **267**, 1067-82.
- Busa T., Clochiatti R., Cristofolini R. (2002) The role of apatite fractionation and REE distribution in alkaline rocks from Mt. Etna, Sicily. *Mineralogy and Petrology* **74**, 95-114.
- Cawthorn R.G. (1996) Layering intrusions. Developments in Petrology. Amsterdam—Lausanne—New York—Oxford—Shannon—Tokyo, Elsevier Science B.V. All rights reserved., 531, ISBN Hardbound 0 444 81768 9.
- Kalashnikov A.O., Konopleva N.G., Pakhomovsky Y.A., Ivanyuk G.Y. (2016) Rare Earth Deposits of the Murmansk Region, Russia—A Review. *Soc. Econ. Geol. Inc. Econ. Geol.* **111**, 1529–1559.
- Kogarko L.N. (1977) General regularities of differentiation of magmas oversaturated with alkalis. *Geochem. Int.* **14** (14), 9-25.
- Kogarko L.N. (1996) Geochemical Models of Supergiant Apatite and Rare Metal Deposits Related to Alkaline Magmatism. *Geochem. Int.* **33**(4), 129-149.
- Kogarko L.N. (2018) Chemical composition and petrogenetic implications of apatite in the Khibina apatite-nepheline deposits (Kola Peninsula). *Minerals* **8**, 532.
- Kogarko L.N., Krigman L.D., Krot T.V., Ignatenko K.I. (1986) Influence of chemical composition of magmatic melt on the solubility of P₂O₅. *Geochemistry International* **10**, 138.
- Kogarko L.N., Lahaye Y., Brey G.P. (2009) Plume-related mantle source of super-large rare metal deposits from the Lovozero and Khibina massifs on the Kola Peninsula, Eastern part of Baltic Shield: Sr, Nd and Hf isotope systematics. *Mineralogy and Petrology* **98**, 197-208.
- Kogarko L.N., Williams C.T., Wooley A.R. (2002) Chemical evolution and petrogenetic implications of loparite in the layered, apatitic Lovozero complex, Kola Peninsula, Russia. *Mineralogy and Petrology* **74**, 1-24.
- Kramm U., Kogarko L.N. (1994) Nd and Sr isotope signatures of the Khibiny and Lovozero apatitic centres, Kola Alkaline Province, Russia. *Lithos*, **32**, 225-242.
- Marakushev A.A.; Suk, N.I. (1993) Experimental modeling of the Khibiny layered nepheline-syenite massif to clarify the genesis of apatite deposits. *Russ. J. Earth Sci.* **330**, 241-244.
- Tegner C., Cawthorn G., Kruger J. (2006) Cyclicity in the Main and Upper Zones of the Bushveld Complex, South Africa: Crystallization from a Zoned Magma Sheet. *J. Petrology* **47**, 2257-2279.