ЛОПАРИТ АЛЛУАЙВСКОГО УЧАСТКА ЛОВОЗЕРСКОГО ЭВДИАЛИТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Михайлова Ю.А., Малыгина А.В., Пахомовский Я.А., Базай А.В., Калашников А.О.

Геологический институт КНЦ РАН, Анатиты, alexaeule@yandex.ru

Второй по размерам после Хибинского, девонский Ловозерский щелочной массив расположен в западной части Кольского полуострова, среди метаморфических комплексов Кольско-Норвежского мегаблока. Наиболее характерными его чертами являются чёткая расслоенность, огромное количество послойных ксенолитов слабопереработанных оливиновых базальтов, туфов и туффилов ловозерской свиты и наличие крупнейших месторождений Ti, Nb, Ta, REE и Zr [1, 2].

Массив сложен субгоризонтальными (падение к центру массива под углами до 10°) ритмично чередующимися слоями нефелиновых сиенитов фойяит-малиньит-шонкинитового ряда и

Рис. 1. Схема геологического строения Ловозёрского щелочного массива (по [1] с дополнениями [3]) и Аллуайвского участка Ловозёрского эвдиалитового месторождения [2].

мельтейгит-уртитов. Его нижняя часть представлена дифференцированным комплексом (мощностью более 2 км) из более чем 7 ритмично чередующихся пачек пород, в которых от подошвы к кровле постепенно нарастает содержание микроклин-пертита, щелочных амфиболов и клинопироксенов с соответствующим переходом от уртитов к ийолитам, затем к фойяитам и малиньитам. На контакте между соседними слоями располагаются тонкие (до 50 см) прослои лопаритсодержащих малиньитов-шонкинитов (со стороны подстилающих нефелиновых сиенитов) – ийолитов-мельтейгитов (со стороны покрывающих фойдолитов) [3].

Эвдиалитовый комплекс мощностью 100–800 м включает линзы тех же самых пород, что и дифференцированный комплекс, но он сравнительно слабо дифференцирован и существенно обогащён эвдиалитом (до 80 об. %) [1-4]. Хотя эвдиалитсодержащие породы обычно обеднены лопаритом [2, 3], развитые среди них отдельные линзы нефелиновых сиенитов и фойдолитов с низким содержанием эвдиалита включают в себя лопарит в количестве 0.5–1 об. %. Это позволяет рассматривать Эвдиалитовый комплекс в качестве сверхкрупного Zr-REE-Ti-Nb-Ta месторождения, наиболее перспективными в пределах которого являются Аллуайвский (см. рис. 1) и Чивруайский участки [3].

В пределах Ловозерского массива был детально изучен Аллуайвский участок. Он сложен эвдиалитовыми малиньитами, резко доминирующими над другими разновидностями пород (63 %). Среди малиньитов располагается протяжённый пласт фойяитов (18 % от всего объема пород) мощностью до 100 м. Шонкиниты и фойдолиты (8 % и 10 % соответственно) слагают разрозненные послойные линзы в толще малиньитов.

В пределах Аллуайвского участка лопарит встречается повсеместно, хотя его содержание варьирует от единичных мельчайших (до 5 мкм) включений в пороодообразующих минералах до 3 об.% [2]. Лопарит – $(\text{Na}, \text{REE}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb})\text{O}_3$ – сложный редкоземельный титано-ниобат из группы перовскита [6]. Благодаря широко проявленным изоморфным замещениям, лопарит и другие представители этой группы являются чувствительными индикаторами условий минералообразования, что позволяет использовать их в качестве типоморфных минералов [7].

Методика исследования

Для выявления закономерностей изменения состава лопарита в пределах Ловозёрского эвдиалитового месторождения использовался метод трёхмерного минералогического картирования, ранее опробованный на Ковдорском месторождении магнетита, апатита и бадделеита [5]. Сначала был произведен отбор координатно-привязанных образцов (через 5 м) из керна скважин, пробуренных в пределах Аллуайвского участка (см. рис. 1), и изготовлены комбинированные шлифы. Их изучение проводилось при помощи оптического и электронного микроскопов (Leo-1450 с EDS-анализатором Quantax). Затем был проведен волнодисперсионный микрозондовый анализ состава лопарита в 198 образцах при помощи электроннозондового микроанализатора Cameca MS-46. Факторный анализ содержания оксидов в массовых процентах произведён методом главных компонент с варимаксным вращением в программе Statistica-8. Закономерности изменения состава минерала в пространстве анализировались по трёхмерной минералогической модели Аллуайвского участка, построенной при помощи программного комплекса Micromine-16.

Результаты

После обработки данных микрозондового анализа выяснилось, что кроме собственно лопарита в выборку попали и другие минералы группы перовскита – луешит, перовскит, таусонит (табл. 1). Однако их доля от общего количества анализов невелика – около 35 анализов. Результаты факторного анализа содержаний оксидов в массовых процентах представлены в таблице 2 и на рисунке 2. Первый фактор выявил основную схему изоморфных замещений: $0.5\text{Na}^+ + 0.5\text{REE}^{3+} + \text{Ca}^{2+} + 2\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow 2\text{Nb}^{5+} + 2(\text{Nb}, \text{Ta})^{5+}$ – т. е. «лопарит + перовскит $\leftrightarrow$ луешит», которая обуславливает отрицательную корреляцию между Nb+Ta и REE+Ti (табл. 1). В большинстве образцов малиньитов и шонкинитов рассматриваемый минерал обогащён Zr и REE, – при этом, часть образцов малиньитов содержит в своем

Рис. 2. Результаты факторного анализа данных о составе лопарита.
Длины векторов-переменных и векторов-объектов не согласованы.

составе лопарит с повышенным содержанием тория, тантала и железа. Вместе с тем, лопариты малиньитов образуют компактное поле точек, что означает отсутствие каких-либо значительных флуктуаций в составе лопарита этих пород. В фойяитах и урритах лопарит характеризуется повышенным содержанием Nb вплоть до перехода в луешит (рис. 2).

Таблица 1. Данные о химическом составе лопарита (мас. %).

Компонент	медиана±станд. откл. min–max	Компонент	медиана±станд. откл. min–max
SiO ₂	<u>0.64±0.98</u> 0.08–4.6	K ₂ O	<u>0.12±0.11</u> 0–1.06
TiO ₂	<u>38.27±5.37</u> 20.13–51.4	Nb ₂ O ₅	<u>15.42±8.98</u> 6.88–50.12
ZrO ₂	<u>0.32±0.15</u> 0–0.46	Y ₂ O ₃	<u>0.18±0.1</u> 0.03–0.3
Al ₂ O ₃	<u>0.23±0.4</u> 0.02–1.53	La ₂ O ₃	<u>7.95±1.53</u> 1.59–10.12
FeO	<u>0.31±0.5</u> 0–5.82	Ce ₂ O ₃	<u>14.54±3.17</u> 1.47–19.56
MgO	<u>0.04±0.03</u> 0–0.08	Pr ₂ O ₃	<u>0.95±0.37</u> 0.13–2.05
CaO	<u>3.33±1.53</u> 0.34–17.84	Nd ₂ O ₃	<u>3.22±1.02</u> 0.26–8.29
MnO	<u>0.21±0.38</u> 0–1.07	Sm ₂ O ₃	<u>0.41±0.58</u> 0.14–2.61
SrO	<u>4.56±1.89</u> 0.33–14.11	Gd ₂ O ₃	<u>0.17±0.14</u> 0–0.38
BaO	<u>0.55±1.02</u> 0–2.62	ThO ₂	<u>1.51±1.84</u> 0.25–12.87
Na ₂ O	<u>8.06±1.8</u> 2.89–14.02		

На разрезах через Аллуайвский участок месторождения (рис. 3) общее содержание редкоземельных элементов в лопарите малиньитов незначительно возрастает с глубиной. На этом фоне проявлено несколько горизонтов лопарита с пониженным содержанием редкоземельных элементов, связанных, прежде всего, с линзами фойдолитов. Содержание Nb и Ta ведёт себя обратно пропорционально таковому REE и Ti вследствие изоморфизма по основной для рассматриваемого комплекса (лопарит+перовскит)–луешитовой схеме $0.5\text{Na}^+ + 0.5\text{REE}^{3+} + \text{Ca}^{2+} + 2\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow 2\text{Na}^+ + 2(\text{Nb,Ta})^{5+}$.

Таблица 2. Результаты факторного анализа данных о составе лопарита.

Компонент	Фактор 1	Фактор 2	Компонент	Фактор 1	Фактор 2
SiO ₂	-0.280	0.050	Y ₂ O ₃	0.107	0.191
TiO ₂	0.790	-0.546	La ₂ O ₃	0.599	0.579
ZrO ₂	0.144	0.220	Ce ₂ O ₃	0.863	0.399
Fe ₂ O ₃	-0.160	-0.271	Pr ₂ O ₃	0.561	0.373
CaO	0.433	-0.646	Nd ₂ O ₃	0.841	0.006
SrO	0.066	-0.488	Sm ₂ O ₃	0.063	-0.011
Na ₂ O	-0.294	0.807	Gd ₂ O ₃	0.141	0.150
K ₂ O	-0.065	0.089	ThO ₂	-0.303	-0.558

Рис. 3. Вариации содержания некоторых оксидов в лопарите:
REE₂O₃ – слева, Nb₂O₅ – справа (а, б, в – разрезы с запада на восток; г – разрез с севера на юг).

Nb ₂ O ₅	-0.916	0.284	Вклад в дисперсию, %	23	16
Ta ₂ O ₅	-0.260	-0.267			

Примечание: жирным шрифтом выделены факторные нагрузки, превышающие значение ± 0.5 .

С учётом изменчивости состава эвдиалита (см. статью Малыгиной и др. в настоящем сборнике), можно заключить, что разработка комплексных Zr-REE-Ti-Nb-Ta руд месторождения должна опираться на детальную 3-мерную модель месторождения с целью оперативного управления процессом получения эвдиалитового и лопаритового концентратов определённого состава. Это, в свою очередь, требует построения геометаллургической модели эвдиалитового месторождения, учитывающей технологические требования соответствующих обогащательных и гидрометаллургических процессов.

Работы проводились при финансовой поддержке Программы 48 Президиума РАН.

Литература

1. Буссен И.В., Сахаров А.С. Петрология Ловозерского щелочного массива. Л.: Наука, 1972. 296 с.
2. Уткин М.Ю., Сухарев В.Н., Киричек О.П., Уткина Г.А., Лопатин А.С., Кононова Л.Н., Гордиенко А.В., Сайков С., Михаэлис Н.Г. Отчёт о предварительной разведке эвдиалит-лопаритовых и эвдиалитовых руд участка Аллуайв месторождения Чинглусуай в 1989-1992 гг. (книга 1). Ревда, 1995 г. 144 с.
3. Kalashnikov A.O., Konopleva N.G., Pakhomovsky Ya.A., Ivanyuk G.Yu. Rare Earth Deposits of the Murmansk Region, Russia—A Review // *Economic Geology*, 2016. V. 111. P. 1529-1559.
4. Korchak Yu.A., Men'shikov Yu.P., Pakhomovskii Ya.A., Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu. Trap Formation of the Kola Peninsula // *Petrology*. 2011. V. 19. N. 1. P. 87-101.
5. Mikhailova, J.A., Kalashnikov, A.O., Sokharev, V.A., Pakhomovsky, Ya.A., Konopleva, N.G., Yakovenchuk, V.N., Bazai, A.V., Goryainov, P.M., Ivanyuk, G.Yu. 3D mineralogical mapping of the Kovdor phoscorite–carbonatite complex (Russia) // *Mineralium Deposita*. 2016. V. 51 (1). P. 131-149.
6. Mitchell R.H., Welch M.D., Chakhmouradian A.R., Mills S. Nomenclature of the perovskite supergroup: A hierarchical system of classification based on crystal structure and composition // *Mineral. Mag.* 2017. V. 81. P. 411-461.
7. Pakhomovsky Ya.A., Ivanyuk G.Yu., Yakovenchuk V.N. Loparite-(Ce) in rocks of the Lovozero layered complex at Mt. Karnasurt and Mt. Kedykvyrpakhk // *Geology of Ore Deposits*. 2014. V. 56. N. 8. P. 685-698.