

Минералогия редкометалльных россыпей Ловозерского массива

Лаломов А.В., Григорьева А.В.

Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, lalomov@mail.ru

Аннотация. Редкие металлы являются основой высокотехнологичных отраслей промышленности. В настоящее время практически единственным источником редкометалльного сырья России является Ловозерский ГОК, разрабатывающий лопаритовые руды одноименного массива. При этом комбинат испытывает ряд проблем горнотехнического характера, что ставит вопрос о необходимости диверсификации сырьевых источников. Таким источником могут служить редкометалльные, преимущественно лопаритовые россыпи, расположенные в обрамлении массива и пределах центральной Сейдозерской впадины. Россыпи образованы в результате ледниковых, эрозионных и тектонических процессов, сопровождавшихся разрушением и перетолжением первичных пород Ловозерского массива.

В статье представлены новые оригинальные данные по минералогии Сергеваньского участка Ревдинской россыпи (северная оконечность массива). На основании технолого-минералогического опробования и широкого спектра аналитических исследований впервые сделана попытка характеристики всего спектра тяжелых минералов, определены главные россыпные минералы - носители редких и редкоземельных элементов, проведена их количественная оценка. Исследование минерального состава тяжелой фракции показало, что в россыпеобразующей толще преобладают специфические минералы нефелиновых сиенитов, в подчиненном количестве встречаются минералы гранито-гнейсового комплекса.

Было установлено, что помимо основного россыпеобразующего минерала лопарита в россыпи присутствует еще несколько минералов-носителей редкометалльной минерализации (эвдиалит, титанит, лоренценит, лампрофиллит и апатит), что может быть использовано для расширения сырьевой базы Ловозерского ГОКа. В работе охарактеризованы некоторые минералогические и химические особенности, позволяющие установить их принадлежность к разным типам пород, слагающим Ловозерский массив.

Ключевые слова: россыпи, редкие металлы, Ловозерский массив.

Mineralogy of rare-metal placer deposits of the Lovozero massif

Lalomov A.V., Grigor'eva A.V.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, lalomov@mail

Abstract. Rare metals are the basis of high-tech industries. Currently, almost the only source for rare metal feedstock in Russia is the Lovozero GOK, which develops loparite ores of the same massif. At the same time, the plant is experiencing a number of mining problems, which raises the question of the need to diversify the feedstock sources. Such a source can be rare-metal loparite placers located in the frame of the massif and within the central Seydozero depression. The placers were formed as a result of glacial, erosive and tectonic processes accompanied by the destruction and redeposition of primary rocks of the Lovozero massif.

The paper presents new original data on the mineralogy of the Sergevansky section of the Revdinskaya placer (north border of the massif). On the basis of technological and mineralogical testing and a wide range of analytical studies, an attempt was made for the first time to characterize the entire spectrum of heavy minerals. Main placer mineral carriers of rare and rare earth elements were identified and their quantitative assessment was provided. The study of the mineral composition of the heavy fraction showed that specific minerals of nepheline syenites predominate in the placer-forming thickness. The minerals of the granite-gneiss complex are observed in a subordinate amount.

It was found that in addition to the main placer-forming mineral loparite, there are several mineral carriers of rare-metal mineralization (eudialyte, titanite, lorenzenite, lamprophyllite and apatite). The minerals can be used to expand the feedstock base of Lovozero mining and processing plant. The paper describes some mineralogical and chemical features that allow establishing their affinity to different rocks types composing the Lovozero massif.

Keywords: placer deposits, rare metals, Lovozero massif.

Введение

Редкие металлы (в число которых входят и редкоземельные) являются стратегически важным компонентом современных высокотехнологичных отраслей промышленности – электроники, оптики, энергетики, производство высоколегированных сплавов и т. д.

В настоящее время единственным действующим источником редкоземельных металлов (и значительной части редких металлов) в России является Ловозерский ГОК, разрабатывающий лопаритовые руды Ловозерского массива (Пеков, 2001), но добыча ведется в сложных горно-геологических условиях при низкой рентабельности существующих разрезов. В этой связи возникает насущная потребность в диверсификации сырьевых источников комбината и вовлечение в переработку новых видов сырья, переход к добыче руд открытым карьером.

Одним из возможных источников расширения сырьевой базы продукции комбината могут служить уникальные по своему составу и генезису россыпи лопарита, расположенные по периферии Ловозерского массива. Помимо лопарита в россыпях присутствует широкий спектр минералов, несущих редкометалльную минерализацию.

В процессе полевых работ был опробован продуктивный отложения Сергеваньского участка россыпи. Минеральный состав был изучен с использованием оптического и электронно-микроскопического методов. Диагностика и исследование минералов проведены с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-5610LV (Япония) в отраженных электронах (BSE COMPO), оснащенного аналитическим энерго-дисперсионным спектрометром (ЭДС) INCA-Energy 450 (Великобритания), а также методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) в аналитической лаборатории ИГЕМ РАН (аналитик Ковальчук Е.Н.) на приборе JEOL – 8200. Общий хим. Состав продуктивных отложений был изучен методом РФА.

Геология Ловозерского массива и россыпемещающего комплекса

Ловозерский щелочной массив представляет собой сложнопостроенную многофазную интрузию, относящуюся к позднедевонскому комплексу щелочных и нефелиновых сиенитов. Вмещающими являются докембрийские гранито-гнейсы. Основными фазами в составе массива являются дифференцированный комплекс лопаритоносных люявритов-фойялитов-уртитов и комплекс эвдиалитовых люявритов, слагающих верхнюю часть массива (Арзамасцев и др., 2013). Лопаритовое оруденение приурочено к верхней и нижней зонам дифференцированного комплекса (Когарко, 2002).

Лопаритовые россыпи расположены по северной периферии плутона (Шомиокский, и Сергеваньский участки Ревдинской россыпи), на его южном склоне (Райяврская) и у восточного подножья (участки Губы Мотка и Прибрежный), а также на востоке центральной котловины – на перемычке между озерами Сейдозеро и Ловозеро. Продуктивный пласт россыпи приурочен к отложениям склонового комплекса, содержащим обломочный материал местных щелочных пород, флювиогляциальным отложениям и морене местного горного оледенения (Лаломов и др., 2019).

Разведанные запасы Ревдинской россыпи по объему сопоставимы с запасами разрабатываемого Ловозерским ГОКом месторождения Карнасурт или составляют порядка 15 % общих запасов и ресурсов всего массива (месторождения Карнасурт, Умбозеро, Аллуйв и Чинглусуй) (Твердов, 2016).

Минеральный состав продуктивных отложений

Продуктивный класс россыпи представлен рыхлым материалом с размером частиц 0.05–1 мм (49.5 мас. % от исходной пробы), в котором произошло раскрытие сростков, что сделало возможным проведение диагностики и оценки содержаний минералов. Данные химического анализа (метод РФА) показали, что в опробованных продуктивных отложениях Сергеваньского участка содержится Nb – 679 ppm, Ta – 40 ppm, TR – 1389 ppm, Sr – 1416 ppm, Ti – 1.17 мас. %.

Оптическое определение минерального состава тяжелой фракции показало, что в россыпеобразующей толще преобладают специфические минералы нефелиновых сиенитов (Семенов, 1972),

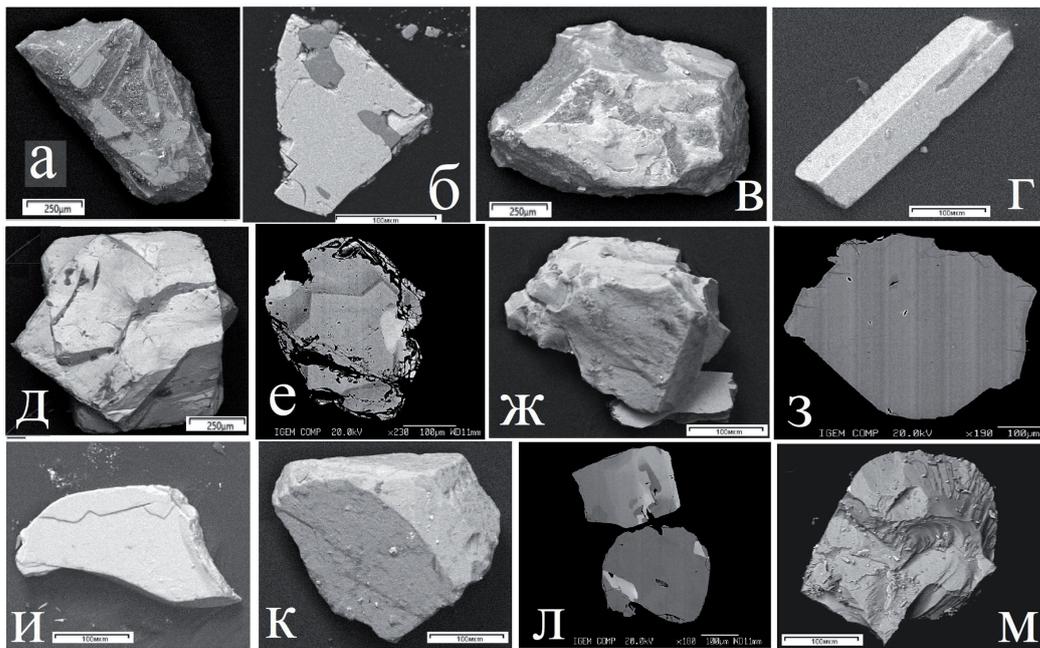


Рис. 1. Минералы тяжелой фракции Сергеваньского участка. а, б – эгирин; в – титанит 1; г – титанит 2; д, е – лопарит; ж, з – эвдиалит; и – лампрофиллит; к – лоренценит; л – апатит; м – энигматит.

Fig. 1. Heavy fraction minerals of the Sergevansky area. а, б – aegirine; в – titanite 1; д – titanite 2; е, ф – loparite; ж, h – eudialite; и – lamprophyllite; j – lorenzenite; к – apatite; л – enigmatite.

в подчиненном количестве встречаются минералы гранитогнейсового комплекса и сквозные минералы, присутствующие во всех типах пород (табл. 1).

В знаковых количествах (менее 0.01 % от состава тяжелой фракции) встречаются кианит, целолиты, андалузит, циркон и щелочные амфиболы. Ильменит в россыпи представлен сростками с другими минералами – эгирином, лоренценитом и титанитом.

Таблица 1. Минеральный состав тяжелой фракции Сергеваньского участка россыпи (об.%).

Table 1. Mineral composition of the Sergevansky section of the placer (vol.%).

минералы	эгирин	титанит	лопарит	лоренценит	лампрофиллит	актинолит	апатит	магнетит	биотит	эвдиалит	энигматит	гранат	эпидот	сростки
% от т.ф.	92.0	2.05	1.49	0.85	0.83	0.67	0.65	0.42	0.35	0.22	0.19	0.10	0.03	0.09

Преобладающими нерудными минералами тяжелой фракции россыпи являются моноклинные пироксены, представленные *эгирином* (рис. 1 а, б). Они составляют более 90 об. % тяжелой фракции или более 22 об. % исходной пробы класса крупности 1.0–0.05 мм. Это обломки кристаллов сохраняют в россыпи (частично или полностью) грани призмы (100 и 110) (рис. 1 а) Они представлены обломками кристаллов зеленого и, преимущественно, темно-зеленого (до черного) цвета. Наблюдаются сростания эгирина с кварцем и ильменитом (рис. 1 б). На поверхности обломков эгирина отмечаются присыпки тонкозернистого материала, состоящего из обломков полевых шпатов, лампрофиллита, нефелина, содалита, каолинита и гидрослюд, а также тончайших частиц (5–18 мкм) редкоземельных минералов, таких как монацит и стенstrupин.

Титанит (второй по распространенности минерал) присутствует в пробе в количестве 2.05 об. % и представлен двумя типами зерен: 1 – плохо окатанными обломками кристаллов неправильной формы желтого цвета разной интенсивности окраски с размером частиц более 0.25 мм (рис. 1 в); 2 – прозрачными удлинёнными кристаллами с желтоватым оттенком и более высоким блеском, размерного класса 0.05–0.12 мм (рис. 1 г). Выделенные типы значительно различаются

по химическому составу как по основным компонентам (пониженное содержание SiO_2 и повышенное – CaO и TiO_2 в титаните 2-го типа), но и по составу изоморфных примесей, причем титанит 2-го типа содержит постоянную примесь Nb_2O_5 в количестве от 0.7 до 1.26 мас. % и спорадические примеси ZrO_2 , Ce_2O_3 , V_2O_5 (табл. 2).

Лопарит содержится в тяжелой фракции в виде двойников кристаллов черного цвета с металлическим блеском и концентрируется преимущественно в немагнитной части тяжелой фракции. Общее количество минерала – 1.5 % от тяжелой фракции (0.13 % или 2.67 кг/м³ на исходную пробу). Минерал демонстрирует высокую степень сохранности кристаллографических форм (рис. 1 д). При изучении внутреннего строения зерен лопарита (рис. 1е), было установлено, что оно обнаруживает зональность, обусловленную неоднородностью химического состава: более темные участки зерен содержат меньшее количество РЗЭ и стронция, и, наоборот, светлые части обогащены этими элементами. Такая зональность обусловлена изменением концентрации элементов в расплаве в процессе кристаллизации минерала (Сук и др., 2013).

Таблица 2. Химический состав тяжелых минералов Сергеваньского участка (РСМА, мас. %).

Table 2. Chemical composition of heavy minerals of the Sergevansky section of the placer (X-ray spectral microanalysis, wt.%).

	эгирин	титанит 1	титанит 2	лопарит	эвдиалит	лампро-филлит	лоренценит	апатит	энигматит
SiO_2	53.14	30.68	23.61		52.02	28.25	25.22	0.38	40.21
FeO об.	21.97	1.10	0.93	0.25	3.27	6.32	1.1	0.01	38.20
TiO_2	2.40	39.95	43.81	42.29	0.39	40.06	65.7		9.60
Na_2O	7.61	1.18	0.53	10.06	15.74	5.51	5.4	1.68	6.24
MgO	3.70				0.06			0.01	1.37
Al_2O_3	0.98				0.31	1.46	2.02	0.01	1.33
MnO	0.62			0.00	2.27	3.6		0.02	2.26
CaO	9.01	26.98	29.99	4.31	5.2	1.07		35.01	0.62
K_2O					0.3	0.56			
ZrO_2			0.66		15.84				
Nb_2O_5			0.98	7.86	0.49	0.44	1.09		
V_2O_5			0.36						
ThO_2				0.77				0.01	
SrO				2.41	1.24	12.2		15.09	
SO_3					0.37			0.01	
Cl					1.19				
Ce_2O_3			0.37		0.54			3.23	
La_2O_3					0.24			2.12	
Nd_2O_3				4.28	0.4			1.47	
La_2O_3				9.21					
Pr_2O_3				1.66				0.46	
Ce_2O_3				17.18					
Sm_2O_3				0.21				0.1	
P_2O_5								37.97	
F								2.67	
NiO									0.24
$\Sigma \text{REE}_2\text{O}_3$				33.30	1.18			7.38	
Сумма	99.42	99.28	100.85	100.56	99.64	99.48	100.53	99.11	99.25

Эдидалит содержится в пробе в небольшом количестве (около 0.22 об. % тяжелой фракции). Он концентрируется в неэлектромагнитной фракции, где составляет около 8 об. % и представлен обломками неправильной формы с размерами от 0.1 до 0.7 мм. Цвет минерала варьирует в светлорозовых и желтовато-оранжевых тонах. Часто на поверхности обломков заметны следы растворения и небольшие поверхностные примазки (рис. 1 ж).

Лампрофиллит содержится в тяжелой фракции пробы в количестве около 0.83 об. %, он концентрируется в неэлектромагнитной фракции, где составляет более 10 об. %. Минерал представлен высокостроичивой разновидностью. Представлен прозрачными обломками золотисто-желтого цвета пластинчатой формы с совершенной спайностью и стеклянным блеском (рис. 1 и).

Лоренценит распределен в пробе между электромагнитной и, преимущественно, немагнитной фракцией, и, в общей сложности, его содержание составляет около 0.7 об. % тяжелой фракции пробы. Минерал представлен обломками разнообразных форм (рис. 9) в коричневой цветовой гамме со стеклянным блеском. В ряде случаев в сростках лоренценит замещает титанит.

Апатит представлен высокостроичивой разновидностью фторапатита с РЗЭ и содержится в тяжелой фракции в количестве 0.2 об. %, в его составе отмечается значительное количество редкоземельных элементов (табл. 2). Апатит в пробе наблюдается в идиоморфных кристаллах, полуокатанных обломках и ксеноморфных выделениях в межзерновом пространстве сростков.

Энигматит представлен обломками черного цвета с размерами частиц от 0.1 до 0.7 мм. В виде микровключений наблюдаются минералы редких земель, преимущественно их оксиды или карбонаты.

Заключение

1. Минеральный состав россыпных объектов, образованных на периферии Ловозерского массива, определяется составом первичных коренных руд и рассеянной минерализации массива.

2. Данные химического анализа (метод РФА) показывают, что в опробованных продуктивных отложениях Сергеваньского участка содержится Nb – 679 ppm, Ta – 40 ppm, TR – 1389 ppm, Sr – 1416 ppm, Ti – 1.17 мас. %, что может являться основанием для исследования возможности промышленного освоения россыпных руд.

3. Установлено, что в россыпи, кроме лопарита – основного рудного минерала, присутствуют следующие минералы-носители редких и редкоземельных минералов (в мас. %): 1 – *apatit* – Σ РЗЭ ($\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{La}_2\text{O}_3 + \text{Pr}_2\text{O}_3 + \text{Nd}_2\text{O}_3$) около 7.4; Sr – 15.1. 2 – *эдидалит* – Σ РЗЭ – 1.18; ZrO_2 – 15.8; Nb_2O_5 – 0.5; SrO – 1.2. 3 – *титанит* – Σ РЗЭ до 1.0; Nb_2O_5 – до 1.24; ZrO_2 – до 1.5; 4 – *лоренценит* – Nb_2O_5 – до 1.6. 5 – *лампрофиллит* – SrO – от 10 до 15; Nb_2O_5 около 0.5, что может быть использовано для изучения вопроса расширения минерально-сырьевой базы комбината.

Работы проведены в рамках темы государственного задания ИГЕМ РАН.

Литература

1. Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Жирова А.М., Глазнев В.Н. Модель формирования Хибино-Ловозерского рудоносного вулканоплутонического комплекса // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 5. С. 397–414.
2. Когарко Л.Н. Проблемы генезиса гигантских редкометалльных месторождений Кольского полуострова // Российская Арктика: геологическая история, минералогия, экология. СПб. Изд-во: ВНИИОкеангеология. 2002. С. 773–787.
3. Лаломов А.В., Григорьева А.В., Бочнева А.А., Магазина Л.О., Чефранов Р.М. Редкометалльные россыпи Ловозерского массива // Разведка и охрана недр. 2019. № 1. С. 51–56.
4. Пеков И.В. Ловозерский массив: история исследования, пегматиты, минералы. М. Изд-во: ТО «Земля». 2001. 464 с.
5. Семенов И.Е. Минералогия Ловозерского щелочного массива. М. Изд-во: Наука. 1972. 305 с.
6. Сук Н.И., Котельников А.Р., Вирус А.А. Кристаллизация лопарита в щелочных флюидно-магматических системах (по экспериментальным и минералогическим данным) // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 4. С. 569–588.
7. Твердов А.А. Редкие металлы Ловозерского массива // Редкие земли. 2016. № 3. С. 164–169.