УДк 552:553.493(470.22)

РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЩЕЛОЧНЫХ И УМЕРЕННО ЩЕЛОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ КАРЕЛИИ, СВЯЗАННЫХ С НИМИ МЕТАСОМАТИТАХ И РУДАХ*

Л. В. КУЛЕШЕВИЧ,
ведущий научный сотрудник, канд. геол.-минерал. наук,
kuleshev@krc.karelia.ru

А. В. ДМИТРИЕВА, *научный сотрудник,*
канд. геол.-минерал. наук

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

Приведены результаты исследований по оценке перспектив использования комплексов щелочных и умеренно щелочных интрузивных пород и связанных с ними метасоматитов и рудной минерализации в качестве сырьевой базы для получения редкоземельных элементов.

Ключевые слова: *Карелия, редкоземельные элементы и минералы, рудопроявления, щелочные и умеренно щелочные породы, карбонатиты, метасоматиты.*

DOI: *10.17580/gzh.2019.03.09*

Введение

Редкоземельные элементы (лантаноиды La, Ce, Nd, Y и др.) нашли широкое применение в различных современных отраслях промышленности и новых технологиях [1, 2]: в металлургии для улучшения свойств легирующих металлов, в сплавах, магнитах, керамике, люминофорах, оптике, лазерах, оптико-волоконном производстве, при обработке ЖК-дисплеев, в качестве катализатора при крекинге нефти, в химической промышленности, при разделении радиоактивных элементов, в высокотемпературных проводниках. Основными типами промышленных месторождений редкоземельных элементов являются эндогенные [3–6]. К месторождениям магматической и гидротермально-метасоматической группы относятся: месторождения в карбонатитах; лопаритовые нефелиновые сиениты и апатит-нефелиновые руды; редкометалльные щелочные (альбитовые) граниты и пегматиты; метасоматиты (скарны, альбититы, грейзены или другие метасоматиты), образующиеся на контакте со щелочными гранитами или сиенитами; некоторые нетрадиционные типы руд (IOCG и сопряженные с ними проявления). Ко второй по значимости группе относятся экзогенные месторождения. Это остаточные коры выветривания по карбонатитам; современные россыпи в ореоле щелочных и гранитных пород; палеороссыпи в метаморфизованных кварцевых конгломератах; осадочные фосфориты, Fe-Mn-конкреции и новые типы месторождений, выявленные в последние годы в углеродистых сланцах и глинистых осадках.

Редкометалльно-редкоземельные месторождения Европы [7] формировались в разные эпохи, в разных условиях и относятся к разным генетическим типам. Наиболее значительные из них связаны со щелочным магматизмом и карбонатитами и объединяются в металлогенические пояса. Редкоземельные (REE) месторождения Фенноскандинавского щита являются комплексными. На их изучение и разведку направлены проекты геологоразведовательных компаний. В Финляндии [8, 9] в девонских карбонатитах месторождения Сокли содержание P_2O_5 составляет 19,9 %; Sr 1,9; Ba 6,8; REE 0,5–1,81 и Zr 0,3 %. В карбонатитах установлены Sr-апатит, монацит, Ce-анкилит, бастнезит, стронцианит, барит, брабантит. В щелочных интрузиях Отанмяки Nb-Y-REE-ресурсы составляют 0,46 млн т. Суммарное содержание оксидов REE (или TR_2O_3) в кварц-полевошпатовых метасоматитах месторождений Контиахо и Катаякангас достигает 2,4 %; Y_2O_3 0,31; NbO 0,76; ZrO_2 0,7–1,5; ThO_2 0,1–0,2 % [8]. Минералы REE представлены фергусонитом, алланитом, колумбитом. Из скарнов месторождения Корснес с полиметаллами добыто 36 тыс. т REE-концентрата с содержанием 0,91 % TR_2O_3. Граниты рифейского комплекса выборгитов содержат TR_2O_3 до 0,6–4,3 %, Th 0,1–1 % и U – до 320 ppm.

В Мурманской области в Хибинском щелочном дифференцированном массиве (Россия) REE сосредоточены в апатит-нефелиновых рудах с содержанием TR_2O_3 0,7–1,7 %; Nb_2O_5 0,1–0,3; Ta_2O_5 0,08–0,024 и ZrO_2 0,35–2 %; в апатите установлено 2,5–5,4 % SrO. Сырье Ловозерского массива представлено в основном лопаритовыми уртитами, в которых REE-RE концентрируются в лопарите, эвдиалите, мурманите, титаните, апатите. Запасы REE-RE-руд Ловозерского месторождения достигают 50–60 млн т. Апатит-лопаритовые руды содержат TR_2O_3 и SrO в количестве 5,6–8,2 и 3,1–6,8 % соответственно, что обеспечивает совместную разработку этих руд с добычей REE-сырья.

Большинство (около 30 проявлений) из известных REE-RE-рудных объектов Республики Карелия также приурочены к щелочным и умеренно щелочным разновозрастным породам и являются комплексными. Многие из них выявлены в пегматитах, которые сами являются полевошпатовым сырьем [10, 11]. Ряд проявлений содержат значительные концентрации Ti, P, Ba, Sr, REE,

* Исследования проводили по программе НИР ИГ КарНЦ РАН.

© Кулешевич Л. В., Дмитриева А. В., 2019

Zr, Nb и другие редкие металлы. Поэтому на Северо-Западе России Карелия, несомненно, является перспективным регионом на отдельные виды REE-RE-сырья.

Цель данных исследований – оценка перспектив территории Карелии на REE. Основные задачи включали установление концентраций и минеральных ассоциаций редкоземельных и ассоциирующих с ними редких элементов в породах повышенной щелочности, связанных с ними или более поздних метасоматитах и рудах.

Методика исследований

Повышенные концентрации REE были установлены в основных типах щелочных и умеренно щелочных пород и связанных с ними рудах практически на всей территории Карелии (**табл. 1**, **рис. 1**).

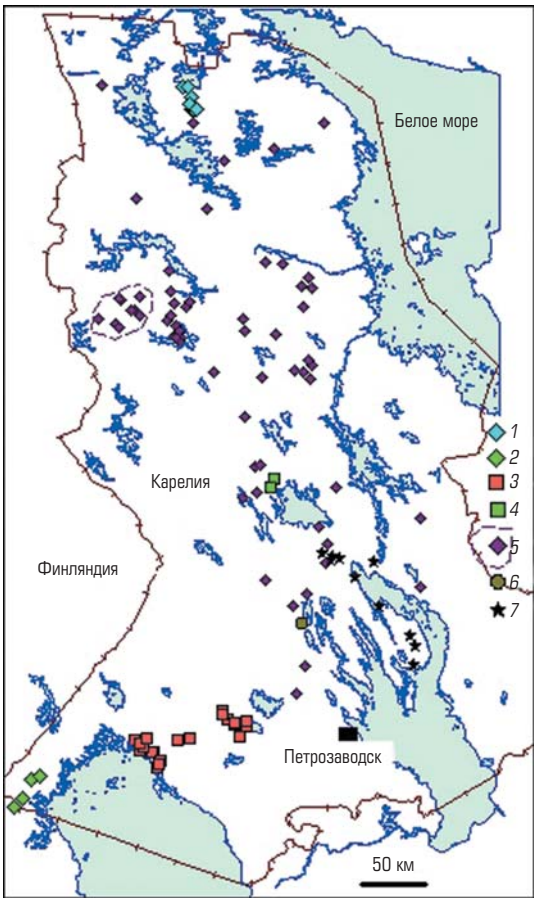

Рис. 1. Схема размещения рудных объектов с REE на территории Карелии (по [6] и данным авторов):
1 – проявления Елетьозерско-Тикшеозерского комплекса (2 млрд лет); *2* – проявления Элисенваарского комплекса (1,78 млрд лет); *3* – проявления в рифейских гранитах Салминского и Улялегского массивов и в их ореоле (1,54–1,5 млрд лет); *4* – проявления в умеренно щелочных массивах Сяргозерского комплекса (2,74 млрд лет); *5* – проявления и пункты минерализации в архейских гранитных комплексах, пегматитах, полевошпатовых метасоматитах (проявления Костомукшской структуры оконтурены штрихпунктиром); *6* – альбитизированные диориты Койкарского силла; *7* – проявления в зонах щелочного метасоматоза (IOCG-тип)

Определение состава пород, руд и содержаний редкоземельных и редких элементов (REE, RE) в них проводили с помощью силикатного и ICP-MS-анализа в сертифицированной аналитической лаборатории Института геологии КарНЦ РАН. Минералы-концентраторы изучали на электронном микроскопе VEGA II LSH, Tescan с ЭДС-приставкой INCA Energy 350. Обобщенные результаты по содержанию REE-RE (в г/т) приведены в **табл. 2** и показаны на диаграммах (**рис. 2**). Для отдельных проявлений информация (массовая доля оксидов, в %) приводится из сводки по Республике Карелия [10, 11].

Результаты исследований

Тикшеозерско-Елетьозерский комплекс щелочно-ультраосновных пород расположен в Северной Карелии (см. рис. 1, табл. 2). Елетьозерский массив (2,08 млрд лет) дифференцирован от ультрабазитов и габбро до нефелиновых сиенитов,

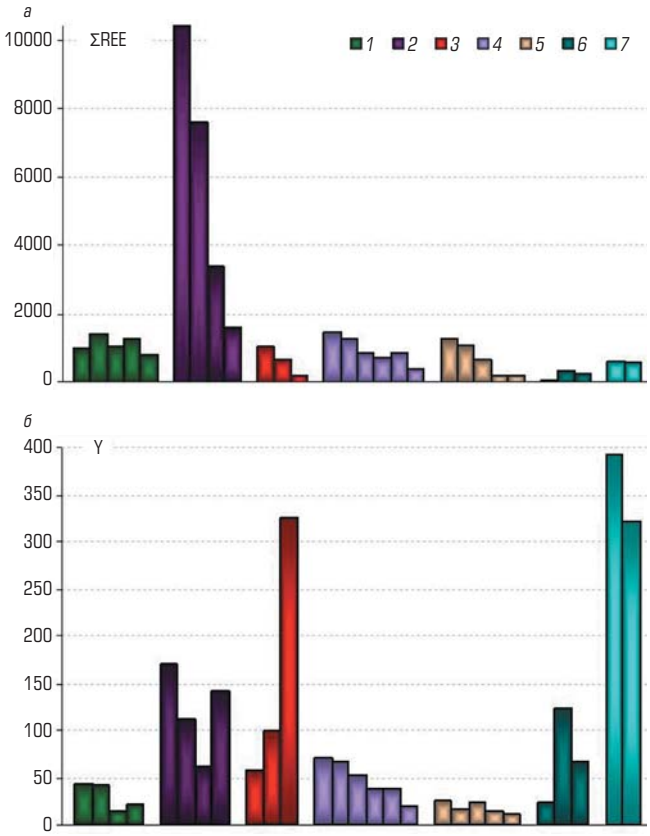

Рис. 2. Содержание редкоземельных элементов (*а*) и Y (*б*) в различных типах пород Карелии, г/т (диаграмма составлена по табл. 2):
1 – Тикшеозерский массив, карбонатиты; *2* – Элисенваарский массив, ладогиты, сиениты; *3* – Салминский, Улялегский массивы, граниты I–II фаз; *4* – Сяргозерский комплекс, пироксениты, габбро, сиениты; *5* – Костомукшская структура, лампроиты; граниты и диориты массивов Шурловаарского, Ниемиярвинского, Восточного, Таловейс; *6* – Койкарская структура, габбро-долериты, альбитизированные диориты, альбититы; *7* – Кумсинская структура, рудные метасоматиты проявления Светлое

Таблица 1. Проявления редкоземельных элементов и перспективные типы пород на территории Карелии

Класс	Проявление	Тип пород	Возраст, млрд лет	REE (г/т), RE-спутники	Местонахождение, массив/комплекс
Эндогенные, магматогенные	Костомукшский куст: Южный карьер, Таловейс	Лампроиты	1,23	REE (1275), Y (25), Ba, Sr, Zr, Hf, Nb, Ta	Костомукшская структура – дайки
	Муставаара, Содер, Мюзилампи	Граниты рапакиви	1,55–1,53	REE (1046), Y (325), Zr	Северо-Восточное Приладожье, Салминский, Улялегский массивы
	Кайвомяки, Райвимяки	Ладогиты-сиениты, титанит-апатитовые руды	1,78	REE (10382–17000), Y (171), Ba, Sr	Приладожье, комплекс Элисенваара (массивы Кайвомяки, Райвимяки)
	Карбонатитовое, С-169	Карбонатиты	2–1,99	REE (1425), Y (48), Ba, Sr, Nb, Zr	Северная Карелия, массив Тикшеозерский
	Елетьозерское	Щелочные ультрамафиты-сиениты, пегматиты	2,08	REE (1000), Ba, Sr, Nb, Zr	Северная Карелия, массив Елетьозерский
	Койкарский и Кумсинский силлы	Диориты-монцо-габбро	1,99	REE (120–274), Y (123), Zr (682), Hf	Койкарская, Кумсинская структуры
	Шурловаарский массив	Умеренно щелочные граниты-диориты	~2,7	REE, Zr, Nb, Ta	Костомукшская структура
	Шалговаара, Сяргозеро, Панозерское	Пироксениты-габбро-монцониты-сиениты	2,74	REE (1459), Y (74), Ba, Sr	Центральная Карелия, комплекс Сяргозерский
	Ряд проявлений из Кадастра Республики Карелия	Граниты, пегматиты	AR_2	REE, Zr, Nb, Ta	Западная Карелия, Беломорье
Гидротермально-метасоматические	Юго-Западное Люпикко	Грейзенизированные скарны, грейзены	1,55–1,49	REE, Be, Sn, F, Li, Sr	Северное Приладожье
	Светлое, Средняя Падма	Na-щелочные (эйситы) и Fe-Mg-метасоматиты	1,76; 1,5; 1,1; 0,27	REE (664), Y (392), REE (до 2000)	Центральная Карелия, Онежская, Кумсинская структуры, зоны деформаций

Таблица 2. Содержание редкоземельных и редких элементов в щелочных породах, карбонатитах, некоторых типах метасоматитов и рудах, г/т

Горная порода	ΣTR	Ga	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Hf	Ta	Th	U
Тикшеозерско-Елетьозерский комплекс, Тикшеозерский карбонатитовый массив												
Сиенит-Ел	972	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.	37,3	55	26	23
Карбонатит (с TR)	1425	2,2	295	2	4510	44	15	27	0,1	1,3	20	1,4
Карбонатит (ср.)	1052	5,6	336	12	3504	41	37	30	0,3	1,6	13,7	1,1
Карбонатит (с Nb)	1251	Н. д.	Н. д.	201	4163	15	105	930	0,5	31,2	23,3	25,5
Карбонатит (ср.)	795	2,4	267	55	3707	22	95	486	0,7	25,4	10,6	89
Элисенваарский комплекс												
Ладогит (ср.)	10382	6	2600	10	3979	171	98	2	3,5	0,3	50	7,6
Ладогит (ср.)	7593	302	1920	133	8567	113	112	18	3,5	0,4	75	8,6
Ладогит (ср.)	3410	209	827	79	7122	62	201	16	5	0,6	33	4,4
Сиенит (ср.)	1586	36	323	241	1755	141	802	129	15	8,9	69	13
Салминский и Улялегский массивы												
Гранит-1	1046	22	1049	175	102	59	250	29	7	1,3	34	3,7
Гранит-1 (ср.)	656	33	566	245	46	100	333	59	11,1	3,3	23,3	4,6
Гранит-2	179	26	60	238	58	325	28	16	3,2	3,3	12	2
Сяргозерский комплекс												
Пироксенит	1459	16	249	31	1363	71	278	30	6,5	1,7	47	2,4
Пироксенит (ср.)	1281	13	152	33	1188	68	142	21	4,6	1,3	23	1,6
Габбро	863	24	229	66	546	52	264	40	12	3	11	3
Габбро (ср.)	704	21	1279	78	939	38	171	22	5,6	1,7	8,3	1,4
Сиенит	825	19	1231	79	1025	38	166	27	6,3	3	12	1,2
Сиенит (ср.)	399	26	2077	67	1324	20	114	11	3,8	0,8	8,1	1,1
Костомукшская структура												
Лампроит	1275	25	2346	226	2949	25	933	223	21	10	25	4,9
Диорит (Шурловаарский массив)	1105	25	3158	105	787	17	244	11	6,5	0,5	29	0,6
Гранит (Шурловаарский массив)	665	23	2597	101	407	23	215	11	6,4	1,2	30	1,2
Гранит (Восточный массив) (ср.)	205	22	843	204	290	14	149	14	5,1	1,9	24	5,3
Гранит (массив Таловейс) (ср.)	181	19	1017	71	698	11	144	4,2	4,1	0,4	11	2,1
Койкарская структура: силл Койкарский												
Габбро-долериты (ср.)	70	25	151	17	95	23	81	8,5	2,2	0,7	1,4	0,3
Диориты (альбитизированные)	326	29	66	3	72	123	682	32	19,3	2,7	9,2	1,8
Жила альбититов	227	21	33	3,5	32	67	632	27	12,8	1,9	6,8	1,2
Кумсинская структура: проявление Светлое												
Метасоматиты рудные	628	3,1	41	4,1	129	392	8,6	0,4	0,6	0,1	0,1	534
Метасоматиты рудные	558	2	31	3	117	321	7,2	0,3	0,5	0,1	0,2	603

Примечание. Н. д. – нет данных; ср. – среднее значение.

в Тикшеозерском массиве, кроме того, развиты карбонатиты. Со щелочно-ультраосновными породами связаны титаномагнетитовые и апатитовые руды, карбонатитовое и полевошпатовое сырье, флогопит, редкометалльная и редкоземельная минерализации [12]. Это делает их привлекательными при комплексной разработке.

В Елетьозерском массиве содержание REE возрастает в поздних фазах комплекса [13, 14], особенно на контакте с жилами сиенитов и щелочных пегматитов (до 972–1000 г/т, см. табл. 2). На отдельных проявлениях участка Суриваара установлено содержание до 0,1–0,4 % [10]. На проявлении Елетьозерское-1 концентрация Nb_2O_5 составляет 0,15–0,56 % (среднее 0,18 %); Ta_2O_5 0,01–0,015; ZrO_2 0,13–1; HfO_2 0,0046–0,03 и ΣTR_2O_3 0,1–0,36 %. В P-Ti-Fe-рудах среднее содержание P_2O_5 2,78 %. В титаномагнетитовых рудах ΣREE не превышает 38–140 г/т, несколько увеличиваясь в апатитсодержащих. В связи с этим требуется селективная отработка Елетьозерского месторождения.

Карбонатиты Тикшеозерского массива содержат, %: кальцит 70–90; апатит 5–20; доломит 5–10; оксиды (магнетит, ильменит, Cr-Fe-оксиды) 5–7; флогопит 1–3; пироксены и амфиболы ~1–4; редкие акцессории [15, 16]. В карбонатитах встречаются зональные метасоматиты по ксенолитам габбро-пироксенитов. Они наиболее обогащены редкими акцессориями (бадделеитом, цирконом, пирохлором и REE-минералами).

Среднее содержание P_2O_5 в апатитовых рудах карбонатитов составляет 2,94–4,18 % (иногда до 16,2 %), суммарные прогнозные ресурсы достигают 51 млн т [11]. С ними связаны высокие концентрации REE и Sr (см. табл. 2). Sr входит в Sr-апатит, Sr-карбонаты (анкилит, карбоцернаит) и Sr-барит [16]. Содержание Sr (1317–4163 г/т) в основном коррелируется с количеством апатита. Концентраторами REE (Σ 970÷1250 г/т) являются фосфаты и карбонаты: апатит, монацит, рабдофанит, бастнезит, синхизит, анкилит, карбоцернаит [13]. Zr распределен неравномерно, его основные фазы – бадделеит и циркон. В амфибол-флогопитовых карбонатитах содержание Zr 337–1000 г/т, Hf 12,6 г/т. Концентрация Nb колеблется и достигает 930 г/т, Ta 35,5 (Nb/Ta = 30÷9). Содержание Y 15–48, Th 3–30, U 0,3–1,7 г/т (см. табл. 2). Более высокие концентрации U (до 255 г/т) обусловлены присутствием U-бетафита и гатчеттолита. Пирохлор и бетафит содержат Ce до 0,8–5,92 %. В поздних карбонат-полевошпатовых метасоматитах установлены Sr-перовскит, стронциобарит, стронцианит. Апатитсодержащие карбонатиты представляют собой комплексное сырье, содержащее P, Sr, REE, Zr, Nb-Ta.

Лампроиты Костомукшской структуры (1,23 млрд лет) образуют несколько кустов (Таловейс, Костомукшский, Корпангский), объединяющих около 50 даек. Содержание редких элементов в лампроитах повышенное и составляет, г/т: ΣREE 1300, Nb 223, Ta 10, Zr 933, Y 25, Sr 2950, Ba 2346 (см. табл. 2). Однако небольшая мощность и протяженность даек не позволяет отнести их к перспективным объектам.

Элисенваарский комплекс (около 1,78 млрд лет) представлен массивами Кайвомяки, Райвимяки, которые расположены в Северо-Западном Приладожье вблизи границы с Финляндией.

Таблица 3. Прогнозные ресурсы и среднее содержание полезных компонентов в породах, рудах и обогащенных концентратах (по Р. А. Хазову [17, 18])

Сырье	Ресурсы, млрд т	P_2O_5, %	TR_2O_3, %	SrO, %	BaO, %	Fsp, %	TiO_2, %
Комплексное сырье (ладогиты)	От 6–7,5 до 12	3,5 (200–250)	0,25 (15)	1 (60)	1 (60)	30–35 (2000)	1,5 (90)
Апатитовый концентрат	0,5–0,6	38–40 (200)	1 (5)	1,5 (7,5)	–	–	–
Калишпатовый концентрат	2	–	–	1–3 (50)	2–6 (50)	99 (2000)	–
Концентрат REE-титанита	0,15–0,3	–	1,5 (2,2–3)	–	–	–	36 (50–70)

Примечание. В скобках приведены ресурсы категории P_3, млн т.

Массивы дифференцированы от ультраосновных и основных до пород среднего состава повышенной щелочности. Наиболее высокие содержания REE связаны с ладогитами (местные названия основных пород комплекса по [17]), тенсбергитами и Ba-Sr-P-Ti-рудами в них (**табл. 3**).

Типоморфными минералами этих пород являются: клинопироксен, амфибол, калиевые полевые шпаты с микропертитами (до 20–80 %), титанит, апатит, акцессорные REE- и RE-минералы. Содержание P_2O_5 в породах основного и ультраосновного состава следующие, %: 0,43–10,5 (среднее 2,5–5); SrO 0,45–2,2; BaO 0,23–2; F 0,12–1,5. Ba и Sr входят в калиевые полевые шпаты. В породах комплекса установлены, г/т (см. табл. 2): ΣREE 1586–10380; Y 62–171; Nb 10–128; Ta 0,4–9; Th 10–77; Zr 120–940; Hf 2–14,7; высокие концентрации Ga 190–346 [18]. В апатитовых концентратах [17] ΣTR_2O_3 достигает 1–1,36 %, в титанитовых – 1,5–1,7 % (см. табл. 3). Минералы-концентраторы REE представлены монацитом, TR-апатитом, титанитом, алланитом, TR-эпидотом, TR-карбонатами и более поздними минералами – лантанитом, бастнезитом и Ca-Sr-Ce-карбонатами [18]. Циркон и бадделеит преобладают в сиенитах с пертитовыми Ba-Sr-полевыми шпатами.

Раннерифейский комплекс анортозитов – гранитов рапакиви (около 1,55–1,53 млрд лет) в Южной Карелии (Северо-Восточное Приладожье) представлен крупными дифференцированными батолитами умеренно щелочных пород – Салминским и Улялегским массивами. Среди гранитоидов выделяют три основные группы: крупнозернистые и овоидные биотит-амфиболовые граниты, кварцевые сиениты (выборгиты, питерлиты, овоидные граниты); равномерно-зернистые биотитовые граниты; Li-F-топазовые граниты [19]. Массивы выделяются повышенными концентрациями, г/т: ΣREE 1046; Y 100; Zr 333 (см. табл. 2). К ним приурочены небольшие проявления Мюзиламби, Камень Наволок, Соддер, Кайроилампи с суммарным содержанием TR_2O_3 до 0,12–0,63 % [10]. Граниты 1-й фазы содержат монацит (Y до 0,1 %), ксенотим, бастнезит, паризит, циркон, уранинит, Y-торит, Y-Th-Zr-силикатофосфаты. Поздние фазы Li-F-гранитов Салминского массива сопровождаются грейзенами с RE-REE-минерализацией, накладывающимися, в том числе, на скарны. В экзоконтактовой северо-западной зоне массива выделяются

Be-Sn-полиметаллические с флюоритом перспективные комплексные проявления (Люпикко, Хопунвара и др.). Для рудных зон характерны повышенные концентрации флюорита (CaF_2 до 1,4–29,84 %), Be (1330 г/т), Sn (2416 г/т), Mo, W, Bi, Th, U, REE, Y. Содержание Y составляет 325–1000 г/т (по [10] – до 0,41 %). Грейзены содержат топаз, берилл, флюорит, монацит, ксенотим, фергусонит, эшинит, бастнезит. На проявлении Южное Люпикко установлено содержание, %: Y 0,1; Yb до 0,1 [10]. Граниты также выделяются аномальными концентрациями радиоактивных элементов. В ассоциации с REE-минералами встречаются торит и уранинит. В коре выветривания Салминского массива и на урановом месторождении Карку в юго-западном обрамлении Салминского массива в перекрывающих толщах развиты REE-содержащие карбонаты и коффинит.

Палеопротерозойские габбро-долериты – диориты. Силлы габбро-долеритов (1,98 млрд лет) Центральной Карелии (Койкарский, Кумсинский) дифференцированы от титаномагнетитовых габбро-долеритов до лейкократовых альбитизированных диоритов с высокой натриевой щелочностью (до 6 %). Альбитизированные диориты содержат, г/т: ΣREE 326, Y 123, Zr 682, Hf 19,3, превышающие в 2–3 раза концентрации в габбро-долеритах (см. табл. 2, рис. 2).

Щелочные метасоматиты в палеопротерозойских вмещающих толщах Карелии представлены жилами альбититов с Cu-S- или более сложной Cu-Au-Pt-U-Se-S-минерализацией (формирующихся от 1,78–1,5 до 0,2 млрд лет). Они сопровождаются халькопиритом, борнитом, гематитом (проявления Медные Горы, Воронов Бор), а на проявлениях Светлое, Средняя Падма – клаусталитом, иттриевой, урановой (или U-V) и Au-Pt-Pd-минерализацией. Содержание REE в метасоматитах с оруденением значительно возрастает. На проявлении Светлое в Центральной Карелии ΣREE равна 628 г/т, Y 392 г/т (см. табл. 2). На месторождениях падминского типа в Онежской структуре ΣREE достигает 1000 г/т. Месторождения и проявления сопоставляются с типом IOCG. Так как ресурсы подобных объектов оценивали только для U, V, Cu и благородных металлов, то, вероятно, при разработке потребуется дополнительная оценка REE.

Неоархейские умеренно щелочные массивы образуют дифференцированные массивы габбро-пироксенит-монцонит-сиенитового состава. К ним относятся массивы Центральной Карелии (Сяргозерский, Шаравалампи, Западно-Хижъярвинский, Панозерский, Эльмус с возрастом 2,74 млрд лет). Повышенные концентрации REE и Sr характерны для ранней габбро-пироксенитовой фазы с апатит-титанитовой минерализацией. В Сяргозерском комплексе (массивы Сяргозерский и Шаравалампи) ΣREE достигает 1458 г/т (см. табл. 2). В других массивах колеблется, г/т: в Западно-Хижъярвинском 447–588; Панозерском 494; Эльмусском 400–1342. Рудная минерализация представлена титанитом, магнетитом, апатитом, концентраторами редких земель являются апатит, титанит, алланит, эпидот и поздние REE-F-карбонаты. Для кислых дифференциатов комплекса характерны высокие концентрации Ba (до 4300 г/т) и Sr (до 1700–4000 г/т). Они входят в состав калиевого полевого шпата и более поздних минералов – барита и целестина.

Граниты архейского возраста, пегматиты и калишпатовые метасоматиты содержат повышенные концентрации оксидов REE до 0,13–0,41 %, в редкометалльных пегматитах установлены содержания Y 0,01–0,1 % [11]. Детально изучали позднеархейские гранитоиды в Костомукшской структуре Западной Карелии. Максимальные концентрации REE (1105 г/т) были установлены для Шурловаарского умеренно щелочного массива (см. табл. 2). С ним связывают щелочной метасоматоз и перспективы обнаружения проявлений REE. Граниты массивов Восточный, Ниемиярвинский, а также золотосодержащий диорит-гранит-порфировый комплекс Таловейс (2,72 млрд лет) содержат невысокие концентрации REE (см. табл. 2).

Заключение

Полученные результаты позволяют основные перспективы обнаружения редкоземельной минерализации на территории Карелии связывать со щелочными и умеренно щелочными массивами с апатит-титанитовыми рудами в них. Для Элисенваарского комплекса (массивы Кайвомяки, Райвимяки) проведена предварительная оценка (см. табл. 3) комплексного сырья и REE-минерализации. Общие ресурсы оксидов REE в ладогитах составляют 15 млн т, 5 млн т приходится на апатитовый концентрат, 3 млн т – на титанитовый (со средними содержаниями TR_2O_3 1 и 1,5 %). Близкий им минеральный тип оруденения связан с умеренно щелочными позднеархейскими интрузиями Сяргозерского комплекса: титанит-апатитовое оруденение массива Шалговаара, по предварительной оценке, может расширить сырьевую базу общих REE-ресурсов. Среди карбонатитов Тикшеозерского массива выделяют несколько типов минерализации, связанных с апатитовыми рудами и акцессориями в них: REE (Ce-La-группы), Ba-Sr, неравномерные, иногда высокие концентрации Nb-Ta, Zr, локально обогащенные U, Th. Однако в целом оценку ресурсов REE не проводили. Для рифейских гранитов рапакиви в Северо-Восточном Приладожье, связанных с ними грейзенов и грейзенизированных скарнов характерны повышенные концентрации Y, Zr, Hf, Be, F, Nb-Ta, REE. Требуется общая переоценка на REE-RE западной экзоконтактовой зоны Салминского массива. Палеопротерозойские альбитизированные диориты (Койкарского и Кумсинского силлов) значительно обогащены Y, Zr, Hf. Для уже разведанных и оцененных месторождений Падминской группы и ряда проявлений в альбититах и сопряженных с ними метасоматитах наряду с основными полезными ископаемыми (U, V, Cu, Au-Pt-Pd) требуется оценка ресурсов Y, REE, Zr.

Изучение щелочных и умеренно щелочных пород позволило установить в них уровень концентраций REE-RE и выделить типоморфные ассоциации минералов перспективных типов. Запасы всех выделенных в качестве перспективных на REE-RE массивов, метасоматитов и руд требуют доразведки и оценки. В отличие от сопредельных регионов (Мурманской области и территории Финляндии), ни для одного проявления (за исключением Элисенваары) на территории Карелии ресурсы REE не оценивали. Полученные результаты должны способствовать поискам и открытию перспективных REE-RE рудных объектов и их прогнозной оценке в докембрии Карелии.

Библиографический список

1. *Humphries M.* Rare Earth Elements: The Global Supply Chain : CRS Report for Congress. 2013. URL: https://fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf (дата обращения: 09.10.2018).
2. *Гасанов А. А., Юрасова О. В., Харламова Т. А., Алафердов А. Ф.* Конструкция электролизеров для окисления церия // Цветные металлы. 2015. № 8. С. 50–54. DOI: 10.17580/tsm.2015.08.06
3. *Авдонин В. В., Бойцов В. Е., Григорьев В. М., Семинский Ж. В., Солодов Н. А., Старостин В. И.* Месторождения металлических полезных ископаемых. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Академический проект, 2005. – 720 с.
4. *Усова Т. Ю.* Редкие металлы и их месторождения // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7. № 11. С. 79–85.
5. *Holland H. D., Turekian K. K.* Treatise on Geochemistry. 2nd ed. – Amsterdam : Elsevier, 2014. – 9144 p.
6. *Smith M. P., Moore K., Kavecsánszki D., Finch A. A., Kynicky J., Wall F.* From mantle to critical zone: A review of large and giant sized deposits of the rare earth elements // Geoscience Frontiers. 2016. Vol. 7. Iss. 3. P. 315–334.
7. *Goodenough K. M., Schilling J., Jonsson E., Kalvig P., Charles N.* et al. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting // Ore Geology Reviews. 2016. Vol. 72. P. 838–856.
8. *Sarapää O., Al Ani T., Lahti S. I., Lauri L. S., Sarala P.* et al. Rare earth exploration potential in Finland // Journal of Geochemical Exploration. 2013. Vol. 133. P. 25–41.
9. *Al-Ani T., Sarapää O.* Geochemistry and mineral phases of REE in Jammi carbonatite veins and fenites, southern end of the Sokli complex, NE Finland // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2013. Vol. 13. Iss. 3. P. 217–224.
10. Минерально-сырьевая база Республики Карелия / под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. – Петрозаводск : Карелия, 2005. Кн. 1. Горючие полезные ископаемые. Металлические полезные ископаемые. – 280 с.
11. Минерально-сырьевая база Республики Карелия / под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. – Петрозаводск : Карелия, 2006. Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. – 356 с.
12. *Shchiptsov V. V.* Industrial minerals of the Tiksheozero-Eletozero alkaline ultramafic-carbonatitic and alkaline gabbroic complexes in Karelia, Russia // Mineral deposit research for a high-tech world : Proceedings of the 12th Biennial SGA Meeting. – Uppsala, 2013. Vol. 4. P. 1781–1783.
13. *Когарко Л. Н., Рябчиков И. Д.* Барий и другие несовместимые элементы в породах Елетьозерской интрузии // Рудный потенциал щелочного, кимберлитового и карбонатитового магматизма : тр. 31-й Междунар. конф. – М. : ГЕОХИ РАН, 2014. С. 51–52.
14. *Sharkov E. V., Shchiptsov V. V., Chistyakov A. V., Bogina M. M.* Mid-Paleoproterozoic titaniferous Elet'ozersky complex of ultramafic-mafic-alkaline rocks in Northern Karelia (Russia) as transitional chamber of Fe-Ti-alkali basaltic magmatic system // Alkaline Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits : Proceedings of XXXII International Conference. – Moscow : GEOKHI RAS, 2015. P. 107–109.
15. *Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Гаранжа А. В., Скамницкая Л. С., Щипцова Н. И.* Геолого-технологическая и экономическая оценка ресурсного потенциала карбонатитов Тикшеозерского массива (формация ультраосновных щелочных пород и карбонатитов) // Геология и полезные ископаемые Карелии : сб. ст. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2007. Вып. 10. С. 159–170.
16. *Кулешевич Л. В.* Редкоземельная минерализация Тикшеозерско-Елетьозерского щелочного комплекса (Северная Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии : сб. ст. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2016. Вып. 18. С. 71–87.
17. *Хазов Р. А., Попов М. Г., Бискэ Н. С.* Рифейский калиевый щелочной магматизм южной части Балтийского щита. – СПб. : Наука, 1993. – 216 с.
18. *Кулешевич Л. В., Дмитриева А. В., Хазов Р. А.* Ba-Sr-P-Ti-TR полевошпатовое сырье Элисенваарского щелочного комплекса (Карелия): геохимия и минералогия редкоземельных элементов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. Естественные и технические науки. 2014. № 4. С. 67–70.
19. *Ларин А. М.* Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. – СПб. : Наука, 2011. – 402 с. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 3, pp. 45–50
DOI: 10.17580/gzh.2019.03.09

Rare-earth mineralization in Karelia's alkaline and moderately alkaline complexes, associated metasomatic rocks and ores

Information about authors
L. V. Kuleshevich [1], Leading Researcher, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, kuleshev@krc.karelia.ru
A. V. Dmitrieva [1], Researcher, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences
[1] Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

Abstract
Rare earth elements (REE) have recently found wide application in different branches of industry and in new technologies. In Karelia REE occur in alkaline rocks, carbonanites, lamproites, high and moderate alkalinity garnets, pergamites, alkaline and associated metasomatites, quartz conglomerates (paleoplacers) as well as in some uranium and noble metal mineralizations, REE exist in various minerals–bastnasite, parasite, monazite, xenotime, loparite, etc. none of commercial-scale ore objects have yet been found in Karelia. For this reason, this study aimed to assess alkaline and moderately alkaline rocks, associated metasomatites, as well as conventional and some unconventional types of ore mineralization in terms of REE occurrence. REE and their minerals were determined by ICP–MS and microprobe analyses. Assaying embraced different-age alkaline and moderately alkaline rock masses and systems, such as Elisenvaar, Tiksheozero–Eletozerom Salminsko-Ulyaleg, Syargozero, Kostomuksha intrusions (Shurlovaar massif, lamproites, garnet massifs), rocks of Koikar and Kumsa sills, skarn alkaline metasomatite (albitite), greisens, Cu–S and Cu–Au–Pt–Se–U mineralization of albitite and associated iron–magnesian metasomatites (related with IOCG-type). Concentrations of REE and associated rare elements, as well as the minerals ensuring these concentrations are determined. These research findings should facilitate discovery of REE-promising mineralizations and their predictive appraisal in the territory of Karelia.
The studies were carried out by R&D program of the Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences.
Keywords: Karelia, rare-earth elements and minerals, ore occurrences, alkaline and moderately alkaline rocks, carbonatites, metasomatic rocks.

References
1. Humphries M. Rare Earth Elements: The Global Supply Chain : CRS Report for Congress. 2013. Available at: https://fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf (accessed: 09.10.2018).
2. Gasanov A. A., Yurasova O. V., Kharlamova T. A., Alaferdov A. F. Electrolyzer design for cerium oxidation. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 8. pp. 50–54. DOI: 10.17580/tsm.2015.08.06
3. Avdonin V. V., Boitsov V. E., Grigoriev V. M., Seminskii Zh. V., Solodov N. A., Starostin V. I. Metalliferrous deposits. 2nd enlarged and revised edition. Moscow : Akademicheskii prospect, 2005. 720 p.
4. Usova T. Yu. Rare metals and deposits thereof. *Sorosovskiy obrazovatelnyi zhurnal*. 2001. Vol. 7, No. 11. pp. 79–85.
5. Holland H. D., Turekian K. K. Treatise on Geochemistry. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2014. 9144 p.
6. Smith M. P., Moore K., Kavecsánszki D., Finch A. A., Kynicky J., Wall F. From mantle to critical zone: A review of large and giant sized deposits of the rare earth elements. *Geoscience Frontiers*. 2016. Vol. 7, Iss. 3. pp. 315–334.
7. Goodenough K. M., Schilling J., Jonsson E., Kalvig P., Charles N. et al. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 72. pp. 838–856.
8. Sarapää O., Al Ani T., Lahti S. I., Lauri L. S., Sarala P. et al. Rare earth exploration potential in Finland. *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. Vol. 133. pp. 25–41.
9. Al-Ani T., Sarapää O. Geochemistry and mineral phases of REE in Jammi carbonatite veins and fenites, southern end of the Sokli complex, NE Finland. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2013. Vol. 13, Iss. 3. pp. 217–224.
10. Mikhailov V. P., Aminov V. N. (Eds.). Mineral and raw material base of the Republic Karelia. Petrozavodsk : Kareliya, 2005. Book 1: Combustible mineral resources. Metallic mineral resources. 280 p.
11. Mikhailov V. P., Aminov V. N. (Eds.). Mineral and raw material base of the Republic Karelia. Petrozavodsk : Kareliya, 2006. Book 2: Non-metallic mineral resources. Underground waters and medical muds. 356 p.
12. Shchiptsov V. V. Industrial minerals of the Tiksheozero-Eletozero alkaline ultramafic-carbonatitic and alkaline gabbroic complexes in Karelia, Russia. *Mineral deposit research for a high-tech world : Proceedings of the 12th Biennial SGA Meeting*. Uppsala, 2013. Vol. 4. pp. 1781–1783.
13. Kogarko L. N., Ryabchikov I. D. Barium and other incompatible elements in rocks of Eletozero intrusion. *Ore Potential of Alkaline, Kimberlite and Carbonatite Magmatism : 31st International Conference Proceedings*. Moscow : GEOKhI RAN, 2014. pp. 51–52.
14. Sharkov E. V., Shchiptsov V. V., Chistyakov A. V., Bogina M. M. Mid-Paleoproterozoic titaniferous Elet'ozersky complex of ultramafic-mafic-alkaline rocks in Northern Karelia (Russia) as transitional chamber of Fe-Ti-alkali basaltic magmatic system. *Alkaline Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits : Proceedings of XXXII International Conference*. Moscow : GEOKHI RAN, 2015. pp. 107–109.
15. Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Garanzha A. V., Skamnitskaya L. S., Shchiptsova N. I. Technological, geological and economic assessment of resource potential of Tiksheozero carbonates (formation of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites). *Geology and Minerals of Karelia : Collected Works*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2007. Iss. 10. pp. 159–170.
16. Kuleshevich L. V. Rare-earth mineralization of Tiksheozero–Eletozero alkaline rock mass (Northern Karelia). *Geology and Minerals of Karelia : Collected Works*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2016. Iss. 10. pp. 71–87.
17. Khazov R. A., Popov M. G., Biske N. S. Riphean potassium alkaline magmatism in the south of the Baltic Shield. Saint-Petersburg : Nauka, 1993. 216 p.
18. Kuleshevich L. V., Dmitrieva A. V., Khazov R. A. Ba-Sr-P-Ti-TR-feldspar raw materials of Elesenvaara alkaline complex, Karelia: geochemistry and mineralogy of rare-earth elements. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2014. No. 4. pp. 67–70.
19. Larin A. M. Rapakivi garnets and associated rocks. Saint-Petersburg : Nauka, 2011. 402 p.