

УДК 553.493(470.21)

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О РЕДКОЗЕМЕЛЬНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ
МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

**А.В. Базай^{1,2}, П.М. Горяинов¹, И.Р. Елизарова³, Г.Ю. Иванюк^{1,2},
А.О. Калашников¹, Н.Г. Коноплева², Ю.А. Михайлова^{1,2}, Я.А. Пахомовский^{1,2},
В.Н. Яковенчук^{1,2}**

¹Отдел исследований природных и синтетических нано- и микропористых веществ (Центр наноматериаловедения) КНЦ РАН, ²ГИ КНЦ РАН, ³ИХТРЭМС КНЦ РАН

Аннотация

Доизучение основных редкоземельных элементов (REE) в месторождениях и проявлениях Мурманской области показало, что первоочередные объекты для технологико-экономической оценки извлечения REE – хибинские апатитовые месторождения; REE-Ti-Fe месторождение Африканда; эвдиалитовый комплекс Ловозерского массива в целом и месторождение Аллуайв, в частности; Zr-REE месторождения Юмперуайв и Большой Пьедестал в Западно-Кейвском массиве щелочных гранитов, а также доломитовые фоскориты и карбонатиты щёлочно-ультраосновных массивов. Технологическая схема разработки этих месторождений должна опираться на результаты трехмерного минералогического картирования, позволяющего оптимизировать селективную отработку руд и обеспечить комплексное использование недр. Сопоставление существующих схем обогащения апатита, ринкита, лопарита, эвдиалита, бадделеита и циркона показало возможность использования наиболее дешевого сернокислотного варианта для всех перечисленных случаев. В пользу такого выбора свидетельствуют необходимость утилизации серной кислоты на медно-никелевых комбинатах Мурманской области, разработка новой технологии извлечения REE из фосфогипса и наличие полезных побочных продуктов, например, сульфата титанила, являющегося прекурсором для производства титановых пигментов, дубителей, титанофосфатных, титаносиликатных и титанатных сорбентов.

Ключевые слова:

редкоземельные металлы, апатит, титанит, ринкит, лопарит, бадделеит, эвдиалит, циркон, Ковдорский массив, Кейвский комплекс, Ловозёрский массив, Хибинский массив, Кольская щелочная провинция, Мурманская область.

Введение

Согласно определению Международного союза теоретической и прикладной химии [1], к редкоземельным элементам (REE) относятся Sc, Y и 15 лантаноидов. Редкоземельные элементы часто называют «зелеными металлами» вследствие их определяющей роли при производстве ветровых электрогенераторов, электромобилей, автомобильных и промышленных катализаторов, препятствующих токсичным выбросам в атмосферу, энергосберегающих источников света и других высокоэкологических продуктов. Поэтому не удивительно, что на протяжении последних десятилетий наблюдается устойчивый рост рыночных потребностей в редкоземельном сырье. В прошлом десятилетии производство REE составляло 105–135 кт [2–4], а к 2016 г. прогнозируется уже их среднегодовое потребление около 160 кт [5]. Наиболее потребляемые редкоземельные элементы – Ce (около 35% от общего количества используемых REE), La (30%), Nd (20%), Y (5%) и Pr (5%), однако с каждым годом всё большее внимание высокотехнологичных отраслей промышленности привлекают тяжелые лантаноиды: Eu, Tb и Dy, – отнесенные в большинстве высокоразвитых стран к «критичным» материалам [6–9].

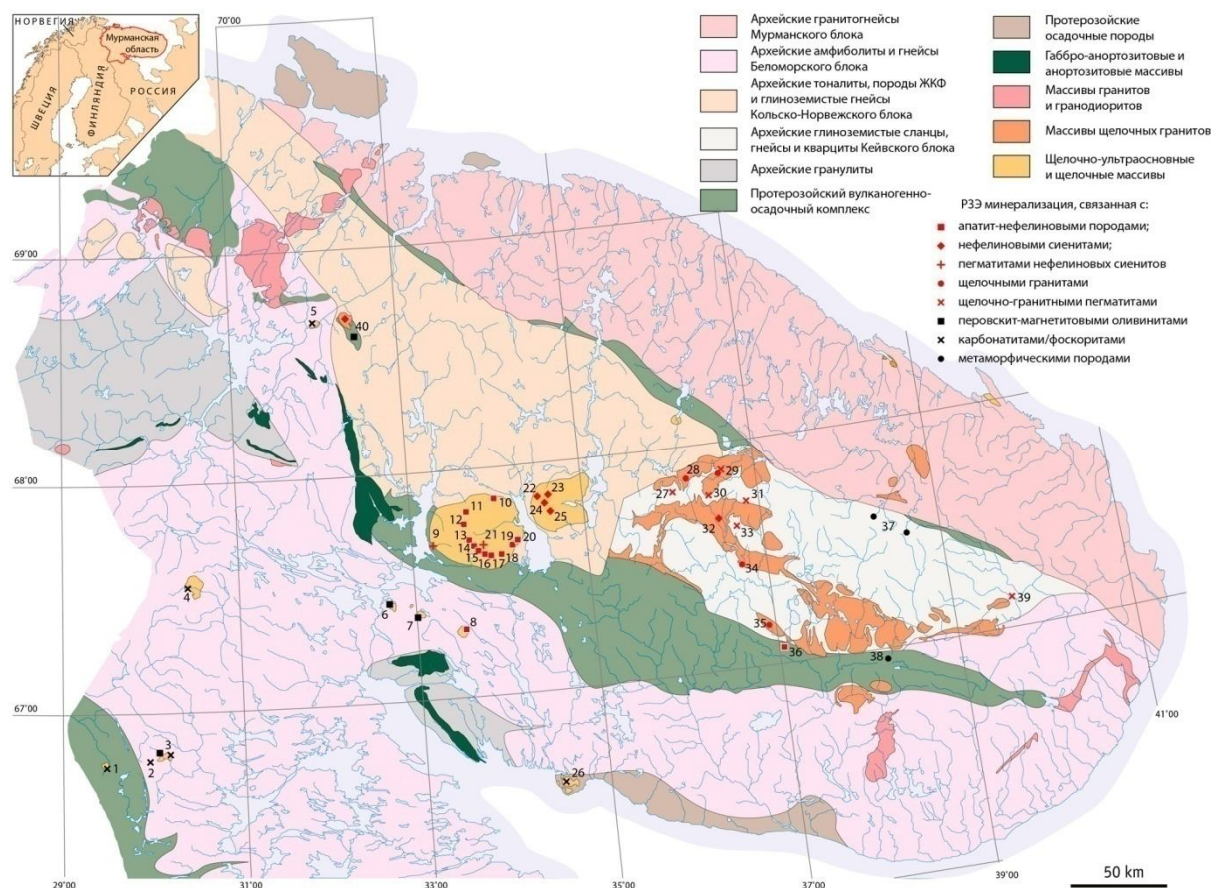


Рис. 1. Геологическая схема Мурманской области [12] и положение REE-месторождений и проявлений: 1 – Ta-Nb месторождение Салланлатва; 2 – поле доломитовых карбонатитов Нама-Вара; 3 – щелочно-ультраосновной массив с карбонатами и фоскоритами Вуориярви; 4 – Ковдорское магнетит-апатит-бадделейтовое месторождение; 5 – Ta-Nb месторождение Себлявр; 6 – Африкандское перовскит-титаномагнетитовое месторождение; 7 – перовскит-титаномагнетитовое месторождение Лесная Варака; 8 – Салмагорское апатитовое месторождение; 9 – щелочные пегматиты р. Малая Белая; 10–20 – Хибинские апатитовые месторождения: 10 – Валенахк, 11 – Партомчорр, 12 – Куэльпорр, 13 – Снежный Цирк, 14 – Кукисвумчорр, 15 – Юкспорр, 16 – Апатитовый Цирк, 17 – Расвумчорр, 18 – Коаива, 19 – Ньоркпахк, 20 – Олений Ручей; 21 – Юкспоррское месторождение ринкита; 22 – Умбозерское месторождение лопарита; 23 – месторождения лопарита Карнасурт и Кедыквырпахк; 24 – лопарит-эвдиалитовое месторождение Аллуайв; 25 – Эвдиалитовый комплекс Ловозерского щелочного массива; 26 – карбонаты Турьего Мыса; 27 – REE-пегматиты Южный Тапперйок и Пессарйок; 28 – (Zr)-REE-месторождение Юмперуайв; 29 – (Zr)-REE-месторождение Большой Пьедестал и пегматитовое поле Малый Пьедестал; 30 – поле амазонитовых пегматитов Ровгора; 31 – поле амазонитовых пегматитов хребта Серповидного; 32 – Сахарйокское REE-Zr месторождение в нефелиновых сиенитах; 33 – амазонитовые пегматиты г. Вюнцпахк; 34 – Ельскоозерские REE-месторождения; 35 – REE-проявления г. Лаврентьевской; 36 – апатитовое проявление щелочно-ультраосновного массива Песочного; 37 – REE-проявления в кианитовых и гранат-мусковитовых сланцах Кейвской серии (Шуурурта, Аккурта, Нусса, Игнурта и др.); 38 – REE-проявление озера Романово в (гранат-мусковит)-серицит-кварцевых сланцах; 39 – REE-пегматиты с. Каневка; 40 – апатитовое и перовскит-титаномагнетитовое проявления щелочно-ультраосновного массива Гремяха-Вырмес

Россия обладает вторыми после Китая запасами редкоземельных металлов. На 1 января 2012 г. запасы REE_2O_3 по категориям А–С1 в нашей стране составляли 18191 кт, по категории С2 – 9484 кт, а прогнозные ресурсы – 5256 кт [10]. Это около 17% мировых запасов, оцениваемых в 110 Мт [5]. Большая часть российских ресурсов REE_2O_3 (около 70%) связана со щелочными комплексами Мурманской области (рис. 1, табл.), главным образом с Хибинским и Ловозёрским массивами нефелиновых сиенитов и фойдолитов [11].

В пределах Ловозёрского массива находится и единственный в РФ действующий рудник редкоземельного сырья, разрабатывающий лопаритовые месторождения Карнасурт и Кедыквырпахк, в которых сосредоточено 14.2% российских запасов REE_2O_3 . Помимо лопаритовых руд, большой интерес представляют нефелиновые сиениты и малиньиты Ловозёрского массива, обогащенные эвдиалитом, который является потенциальным сырьем на Zr и REE. Ресурсы богатых эвдиалитовых руд только на участке Аллуйв оценены более чем в 80 Мт (около 1 Мт REE_2O_3).

Преобладающая часть (60.2%) учтенных редкоземельных запасов России сосредоточена в апатитонефелиновых рудах Хибинского массива. Содержание REE_2O_3 в хибинском фторапатите в среднем равно 0.5–1.2 мас. %, но запасы их весьма внушительны и составляют почти 10 Мт только по промышленным категориям. Закономерное увеличение содержания REE в апатите по мере снижения содержания P_2O_5 в руде повышает промышленные перспективы апатитовых месторождений с бедными рудами и/или небольшими запасами. Несмотря на то, что в настоящее время REE из апатитового концентрата, по сути, не извлекаются, имеющиеся на сегодняшний день технологии и огромные запасы фосфогипса в отвалах позволяют наладить их получение без существенных капитальных вложений [23]. Ещё один потенциальный ресурс редкоземельного сырья в Хибинском массиве – рудопроявления ринкита, самое крупное из которых на г. Юкспорр разрабатывалось в 1930-х гг., но затем было заброшено.

Следующие по важности в отношении REE – щелочно-ультраосновные массивы с карбонатитами (Ковдор, Вуориярви, Салланлатва, Африканда и др.), концентрирующие в себе обогащенную скандием и легкими лантаноидами бадделеит-цирконолит-пирохлоровую минерализацию, а также апатит с меньшим, чем в Хибинском массиве, содержанием REE. Ещё один потенциальный источник REE, причем тяжелых, – Zr-REE-рудопроявления Западных Кейв, генетически связанные с массивами щелочных гранитов и приуроченные либо к контактовым зонам со сланцево-гнейсовой толщей (Пьедестал, Юмперуайв, Тапперйок, Пессарйок и др.), либо к пегматитовым жилам (Ельозёрское, Ровгора, Плоскогорское). Суммарные прогнозные запасы этих рудопроявлений – около 100 кт оксидов REE [11].

Несмотря на наличие столь существенных запасов, в настоящее время добыча и переработка редкоземельного сырья в РФ весьма невелики: в 2011 г. получено всего 2.5 кт REE_2O_3 (из лопарита ловозёрских месторождений), так что здесь имеются перспективы для существенного роста [24]. С этой целью нами в 2012–2014 гг. проведено доизучение перспективных REE-месторождений и проявлений в Мурманской области: хибинских месторождений апатита и ринкита, ловозёрских месторождений лопарита и эвдиалита, скандиеносного Ковдорского фоскорит-карбонатитового комплекса и циркон-фергусонитовых рудопроявлений в кейвских щелочногранитных комплексах [15, 25–38], основные результаты которого представлены в данной работе.

Хибинский массив

Хибинский массив – наиболее крупный российский объект в отношении REE, их основные концентраты (около 12 млн тонн Ln_2O_3) здесь – фторапатит, титанит и ринкит (см. табл.). В фойяитах содержание редкоземельных металлов уменьшается от краев массива к его центру, несколько возрастает в ринчорритах зоны Главного фойдолитового кольца (в основном, благодаря ринкитовой минерализации), уменьшается в ийолит-уртитых и снова резко возрастает (титанито)- апатитонефелиновых породах (рис. 2).

Ресурсы редкоземельного сырья в щелочных комплексах Мурманской области

	Месторождение	Ресурсы REE_2O_3 , кт			Среднее содержание REE_2O_3 в руде, %	Минералы-концентраты REE	Источник
		A-C1	C2	P1			
Хибинский массив	Партомчорр	1505	258		0.20	фторапатит, титанит	[13]
	Кукисвумчорр	1021			0.25		
	Юкспорр	2077	0		0.39		
	Апатитовый Цирк	419	25		0.37		
	Расвумчорр	1174			0.35		
	Коашва	2506	507		0.41		
	Ньоркпахк	224	22		0.37		
	Олений Ручей	1013	470		0.38		
	Куэльпорр	64			0.34		
	Эвеслогчорр			2275	0.44		
	Вуоннемйок			348	0.17		
Все апатитовые месторождения	10003	1282	2623	0.36		наши данные	
Юкспоррское	4	17.4		1.04	ринкит	[11, 15]	
Ловозёрский массив	Карнасурт+Кедыквырпахк	453			1.4	лопарит-(Ce)	[16]
	Умбозёрское	1714			0.95	лопарит-(Ce)	[16]
	Аллуайв	213	2250		1.15	эвдиалит, лопарит-(Ce)	[10, 16, 17]; наши данные
	Весь Эвдиалитовый комплекс			>8000	0.5-1.2		
Африканда		230			0.67	перовскит	[18]
Себлявр				2587	0.24	перовскит	наши данные
Кейвский блок	Сахарйок		22.4	10	0.34	бритолит-(Ce, Ln, Nd), циркон, пирохлор	[19, 20]
	Юмперуайв			60	0.55	фергусонит-(Y), бастнезит-(Ce), алланит-(Ce), монацит-(Ce, Y)	[21]; наши данные
	Большой Пьедестал			40 ¹	0.4	чевкинит-(Ce), монацит-(Ce)	наши данные
	Ельские озера			3	1.57	гадолинит, пирохлор, фергусонит-(Y), бастнезит-(Ce)	[22]

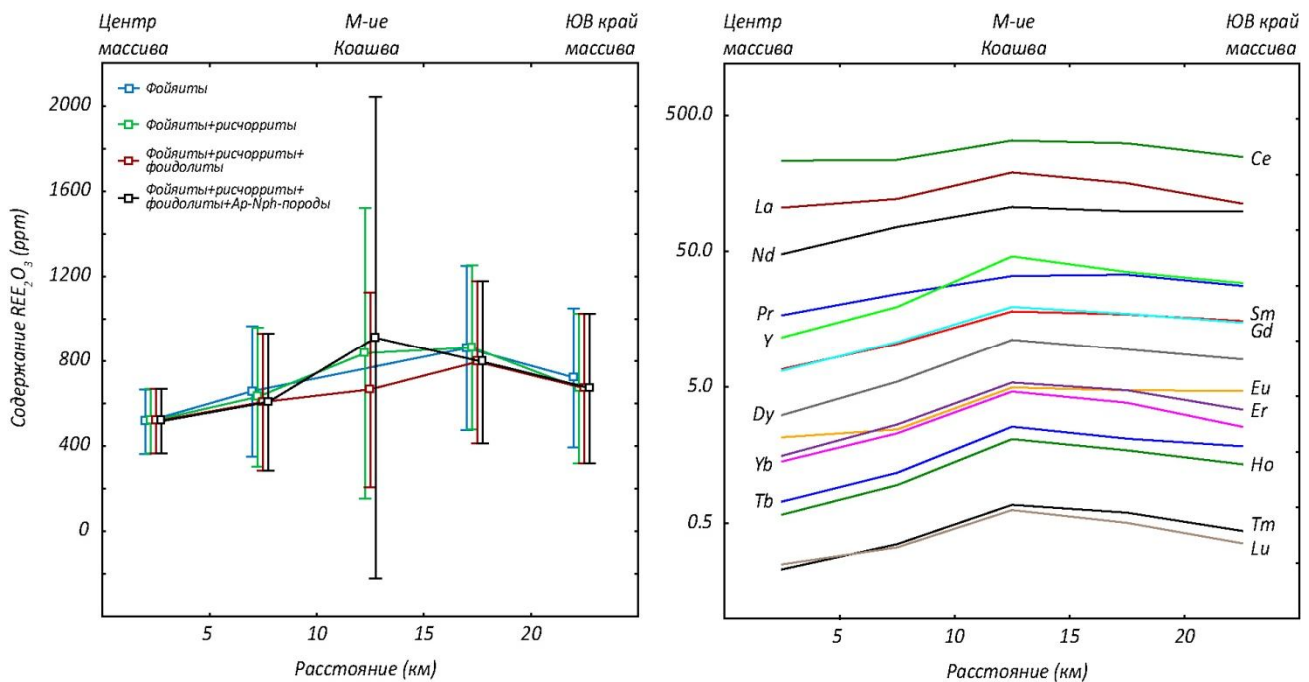


Рис. 2. Среднее содержание REE в породах Хибинского массива по профилю от его центра (г. Вантомнюк) через месторождение Коашва к ЮВ краю у подножья г. Китчапахк

Изучение состава фторапатита в породах Хибинского массива показало [27, 28, 31], что по мере приближения к фойдолитовому кольцу от краевой и центральной частей массива фторапатит освобождается от примесных Na, Ln и Si в пользу Ca, Sr и P. При этом в отношении Ca и Sr проявлена специализация, соответственно, рудных и безрудных секторов Главного кольца: в фойдолитах и апатито-нефелиновых породах рудного сектора самоочищение фторапатита от Ln и Si сопровождается увеличением содержания Ca, а безрудного сектора – Sr. Сходное изменение состава апатита зафиксировано в пределах отдельных апатитовых месторождений и всей рудной зоны: чем богаче руда (выше содержание P_2O_5) и крупнее месторождение, тем меньше стронция и REE в составе фторапатита (рис. 3, табл.). Высвобождаемые редкоземельные металлы локализуются в различных пегматитах, гидротермалитах и метасоматитах, приводя к образованию многочисленных редких минералов, многие из которых имеют выраженные функциональные свойства [33, 34].

Анализ изменения состава ринкита по профилю от западного края массива (точка A на рис. 4) через Малое фойдолитовое кольцо (точка B), рудопроявления Поачвумчорр и Пик Марченко (точка C) к центру Хибинского массива на г. Вантомнюк (точка D) и далее к месторождению Коашва (точка E) и юго-восточному краю массива (точка F) показал [12, 15], что содержание редкоземельных элементов изменяется в нём симметрично относительно центра массива. Наименьшие концентрации REE характерны для ринкита из апатито-нефелиновых пород Коашвинского месторождения, поскольку, подобно фторапатиту (см. рис. 3), в процессе их формирования происходит самоочищение рассматриваемого минерала от примесей и его переход к гётцениту.

Наиболее высоким содержанием REE и наиболее широким их спектром отличается ринкит из рихчорритов района Главного фойдолитового кольца, к которым приурочены все перспективные проявления этого минерала, включая Юкспорское (см. табл.), а также из фойяитов западного сектора массива. Только здесь в состав ринкита в ощутимых количествах входят Gd, Dy и Er, а количество Nd даже превышает содержание La. При изменении такого

ринкита образуются вторичные минералы с повышенным содержанием лантаноидов, в частности, тундрит-(Ce) и чильманит-(Ce) [34].

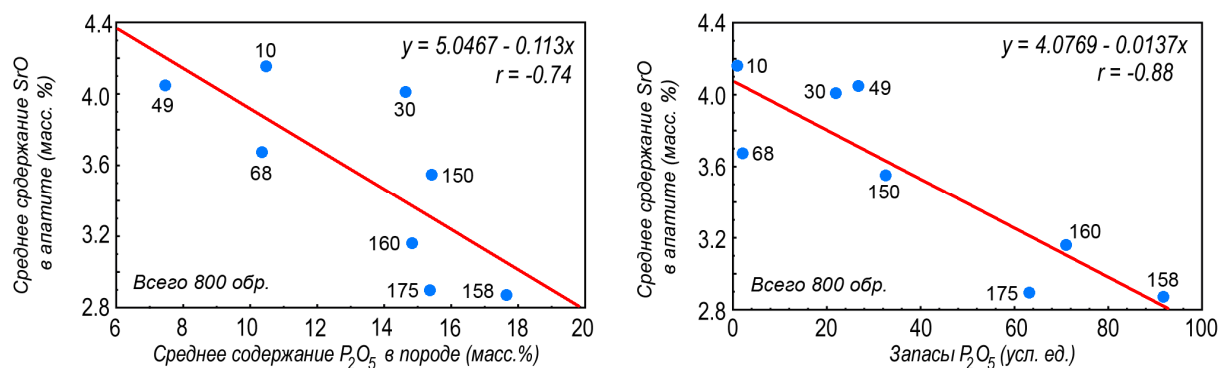


Рис. 3. Среднее содержание Sr в составе фторапатита уменьшается с возрастанием качества руды и размера месторождения (цифры – число изученных образцов)

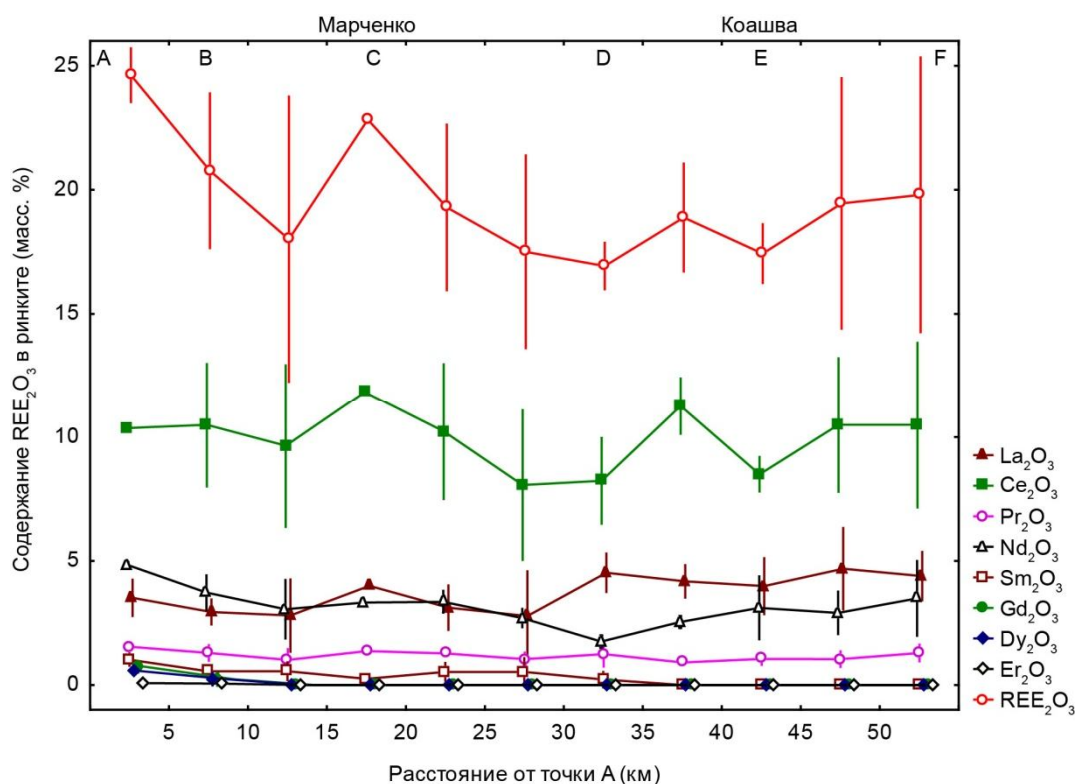


Рис. 4. Изменение содержания REE в ринките по профилю от западного края массива (точка А) через рудопроявления Поачвумчорр и Пик Марченко (точка С) к центру Хибинского массива (точка D), месторождению Коашва (точка E) и ЮВ краю массива (точка F)

Титанит – следующий по важности после фторапатита и ринкита концентратор REE в Хибинском массиве, причем повышенное содержание самого титанита и REE в его составе приурочено к ризчорритам зоны Главного фойдолитового кольца. В титаните апатитонефелиновых месторождений редкоземельных металлов меньше вследствие его самоочищения от микропримесей [12], но содержание самого титанита выше (рис. 5), поэтому переработка титанитового концентрата для целей производства пигментов, дубителей и титаносиликатных сорбентов должна предусматривать выделение Ln₂O₃.

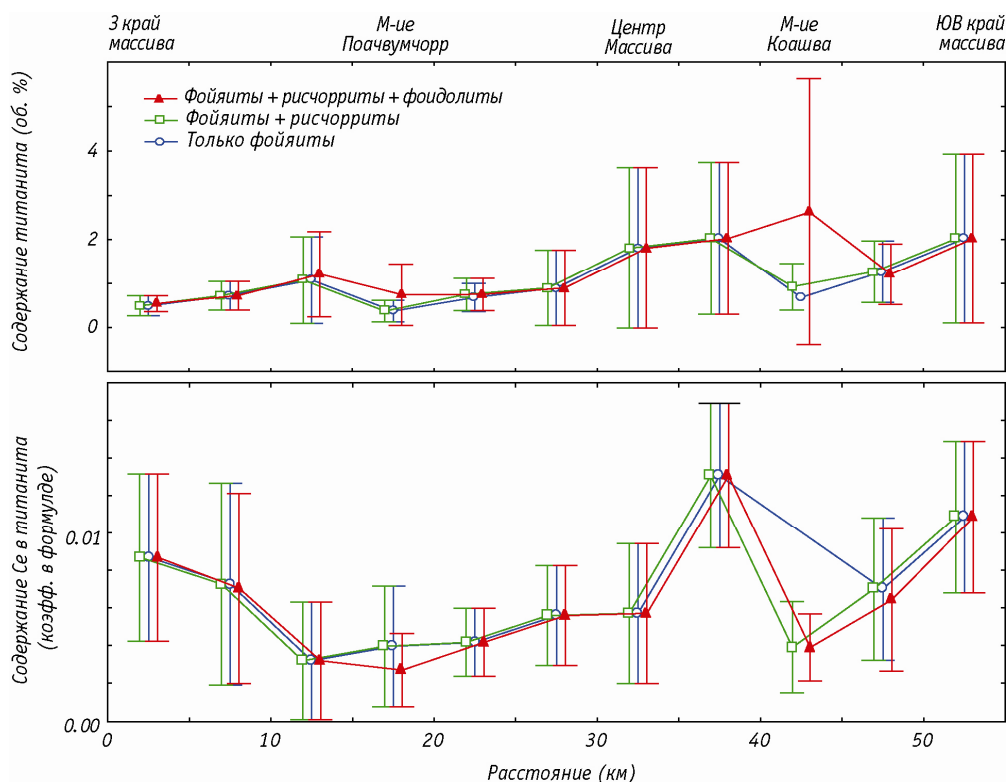


Рис. 4. Изменение содержания титанита в породе и церия в составе титанита по профилю от западного края массива через апатитовые месторождения Поачвумчорр, Пик Марченко и Коашва к ЮВ краю массива

Помимо (титанито)-апатитонефелиновых пород и ринкитсодержащих нефелиновых сиенитов и пегматитов, определённый интерес в качестве источника *REE* вызывают ксенолиты вулканогенно-осадочных пород ловозёрской свиты, которые в большом числе встречаются в районе Малого и Главного фойдолитовых колец и местами существенно обогащены цирконолитом, лопаритом-(Ce), таусонитом, эшинитом-(Ce), кричтонитом, ловерингитом, давидитом-(Ce), фергусонитом-(Y), пирохлором и другими редкоземельными минералами [12, 31]. Кроме того, в последние годы к цирконолиту привлечено повышенное внимание вследствие создания минералоподобных матриц, в которых синтетический аналог цирконолита – основной концентратор актиноидов [39].

В ходе изучения минералов группы цирконолита из контактово-метасоматических образований Хибинского и Ловозёрского комплексов установлено [29], что цирконолит, а также его Ce-, Nd-, Y-аналоги и лаахит образуются в результате изменения ильменита в ходе фенитизации базальтов, туфов и туффитов ловозёрской свиты. В цирконолите широко проявлены изоморфные замещения Na и Ca на *REE*, Th и U, компенсируемые заменой Ti и Zr на Nb, Fe³⁺ и Ta, а также перераспределение редкоземельных элементов между разновидностями, обогащенными Ti (*HREE*) или Nb (*LREE*). Все это обусловило появление Y-, Ce- и Nd-аналогов цирконолита. По аналогии с природными фазами, можно полагать, что изоморфная емкость синтетического цирконолита в отношении актиноидов может быть увеличена введением редкоземельных металлов цериевой подгруппы и железа, однако устойчивость такого соединения к воздействию радиации и агрессивных растворов требует проверки.

Ловозёрский массив

Ловозёрский массив – второй в мире по размеру после Хибинского щелочной вулканоплутонический комплекс – сложен регулярно чередующимися субгоризонтальными слоями нефелиновых сиенитов фойяит-малиньитового ряда («луявритов») и ийолит-уртитов. Вся совокупность таких слоев подразделяется на два комплекса: дифференцированный (внизу) и эвдиалитовый (наверху), различающиеся, по сути, лишь содержанием эвдиалита и контрастностью отдельных слоев фойяитов, малиньитов, ийолитов и уртитов. Крупнейшие в России по запасам Nb, Ta и Ln лопаритовые месторождения гг. Кедыквырпахк и Карнасурт (см. рис. 1 и табл.) расположены в северо-западной части расслоенного комплекса и с 1941 г. разрабатываются подземным рудником «Карнасурт».

На сводных разрезах продуктивных зон лопаритовых пластов I-4 (г. Карнасурт) и II-4 (г. Кедыквырпахк) фиксируется симметричное относительно осевой зоны рудного пласта возрастание содержания полевых шпатов с глубиной, происходящее за счет фельдшпатидов [26, 30, 32]. Содержание темноцветных минералов нарастает из глубины к контакту с фойидолитами, формируя малиньитовый (Карнасурт) или ийолитовый (Кедыквырпахк) рудный пласт, и далее быстро уменьшается до уртитового уровня. Лопарит-(Ce) практически полностью сконцентрирован в пределах рудного пласта, хотя в покрывающих урритах обоих участков фиксируются 1–3 более бедных и маломощных сателлитных прослоя лопаритовых ийолитов.

Лопарит-(Ce) локализуется в узких (10–40 см) малиньито-ийолитовых пластах в виде скелетных метакристаллов с включениями натролита, ломоносовита, рабдофана-(Ce), лабунцовита и других низкотемпературных минералов. Различные участки рудного пласта имеют четко проявленную специализацию в отношении таких включений, и это позволяет оперативно корректировать качество руды, основываясь на составе минералов-примесей в лопаритовом концентрате [30, 32]. Состав лопарита-(Ce) варьирует в сравнительно узких пределах $Lo_{59-70}Per_{11-18}Lue_{5-11}Tsn_{4-7}$ вследствие увеличения содержания Ca, Ln, Al и Ti и уменьшения содержания Na, Mn, Th, Sr, Fe и Ta при переходе от подстилающих нефелиновых сиенитов к рудным фойидолитам/малиньитам и, далее, к покрывающим ийолит-урритам. Содержание REE в лопарите-(Ce) исключительно стабильно и практически не зависит от положения в рассматриваемых рудных зонах. С увеличением общего содержания Ln_2O_3 в лопарите-(Ce) количество Ce_2O_3 и La_2O_3 также возрастает, а содержание оксидов Nd, Pr и Sm практически не изменяется (рис. 5).

Содержание и размер зёрен минералов группы эвдиалита в пределах продуктивных зон лопаритовых пластов I-4 (г. Карнасурт) и II-4 (г. Кедыквырпахк) последовательно уменьшается от подстилающих нефелиновых сиенитов к лопаритовым малиньитам/ийолитам рудного пласта и, далее, покрывающим фойидолитам. Во всех типах пород минералы группы эвдиалита заполняют интерстиции в агрегате зерен нефелина, содалита и микроклин-пертита, замещают паракелдышит, дэлиит и другие безводные цирконосиликаты, а сами замещаются джорджчаоитом и минералами группы ловозерита [26]. Состав минералов группы эвдиалита определяется, главным образом, изоморфизмом по схеме $NaFeZrCl \leftrightarrow LnMn(Nb,Ti)S$, обусловившим появление собственно эвдиалита, манганоевдиалита (резко преобладает), кентбруксита, аллуайвита, а также переходной от манганоевдиалита к аллуайвиту фазы. При последовательном увеличении общего количества Ln_2O_3 в их составе содержание оксидов церия и лантана линейно возрастает в пропорции $Ce_2O_3:La_2O_3 = 2.5:1$, причем в фазах, содержащих менее 3 мас. % Ln_2O_3 , неодим – второй редкоземельный металл после церия (рис. 6).

Как отмечалось, к кровле Ловозёрского массива содержание эвдиалита заметно возрастает (в среднем, до 5–10, местами – до 95 об. %), обуславливая выделение «Эвдиалитового комплекса» площадью около 500 км² и мощностью до 300 м. Наиболее богатые эвдиалитом участки расположены в районе гг. Маннепахк, Сенгисчорр и Аллуайв; в пределах последнего находится Аллуайвское Zr-Nb-REE месторождение с запасами REE_2O_3 порядка 2.5 Мт (см. табл.).

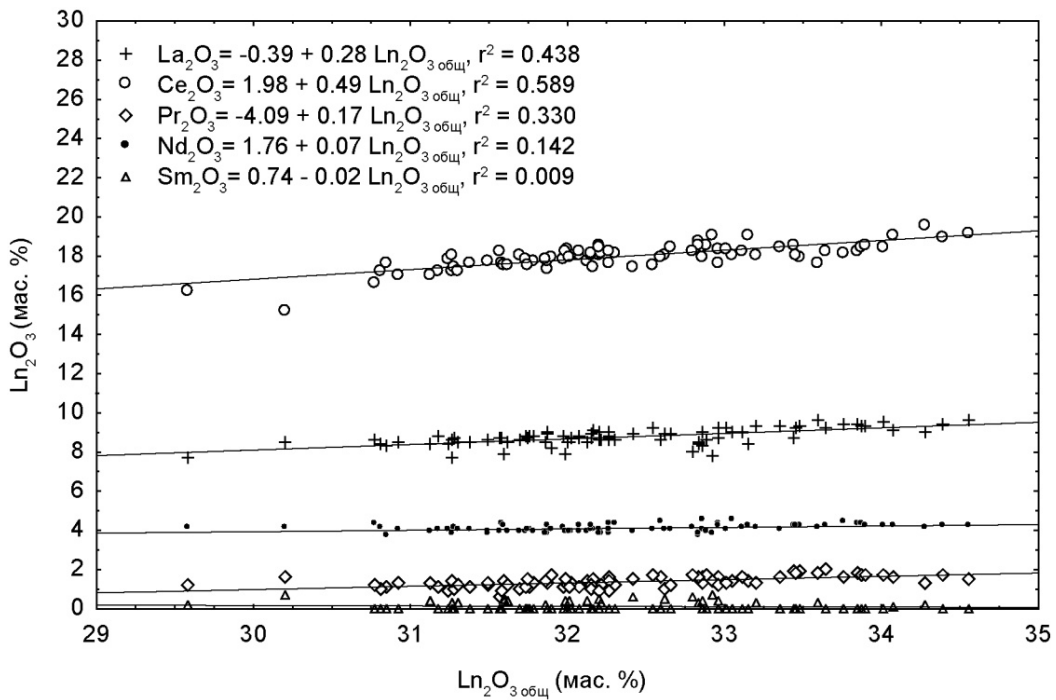


Рис. 5. Соотношение редкоземельных металлов в составе ловозёрского лопарита-(Ce) по данным микрозондового анализа

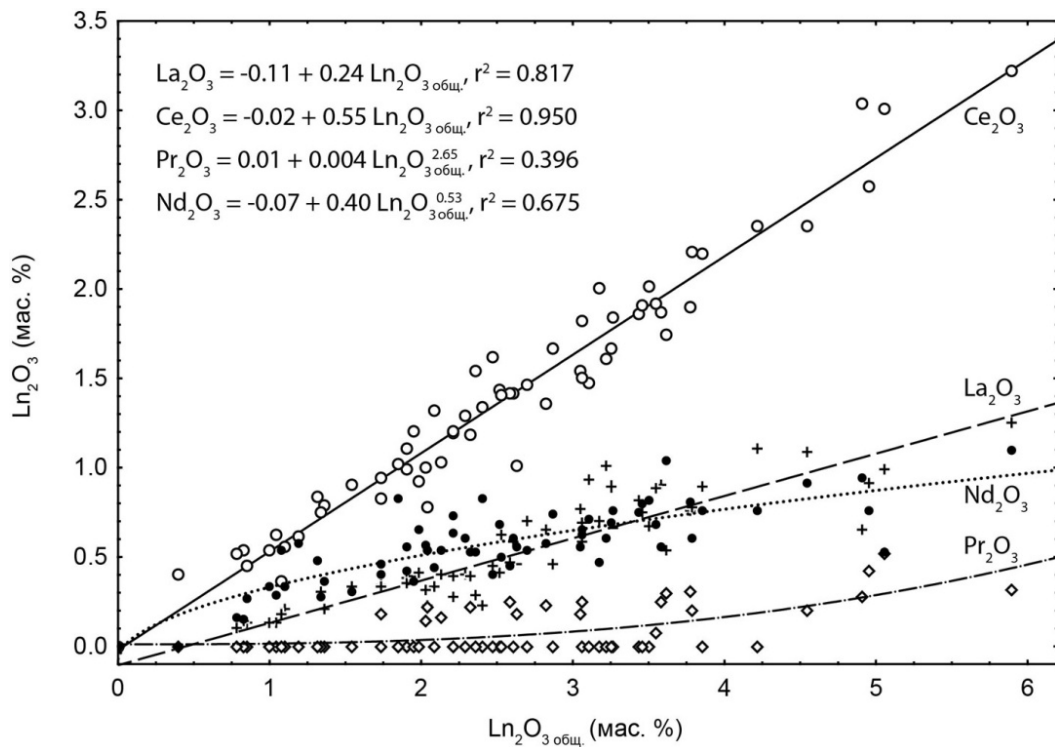


Рис. 6. Соотношение редкоземельных металлов в составе ловозерских минералов группы эвдиалита по данным микрозондового анализа

Ковдорский массив

Трехмерная геологическая модель Ковдорского фоскорит-карбонатитового комплекса, построенная по данным инструментального минералогического изучения 550 образцов, отобранных погоризонтно (-80, -110, -140, -170, -230, -290, -410, -530 и -650 м) из керна 108 скважин [25], выявляет его концентрическую зональность, особенно ярко проявленную на верхних горизонтах. Осевая зона фоскорит-карбонатитовой трубки находится в её крайней южной части и прослеживается на всю доступную изучению глубину (по крайней мере, до -800 м). Она сложена наиболее молодыми карбонатсодержащими разновидностями фоскоритов и карбонатитов (при содержании карбонатов более 50 об. %), связанных непрерывными переходами, а также более поздними жильными кальцитовыми и доломитовыми карбонатитами. Практически весь остальной объем рудного тела представлен магнетит-апатит-форстеритовыми породами – наиболее распространенной разновидностью ковдорских фоскоритов. На контакте фоскорит-карбонатитовой трубки с вмещающими фойдолитами и диопсидитами локализованы наиболее ранние разновидности фоскоритов: апатит-форстеритовые и форстеритовые.

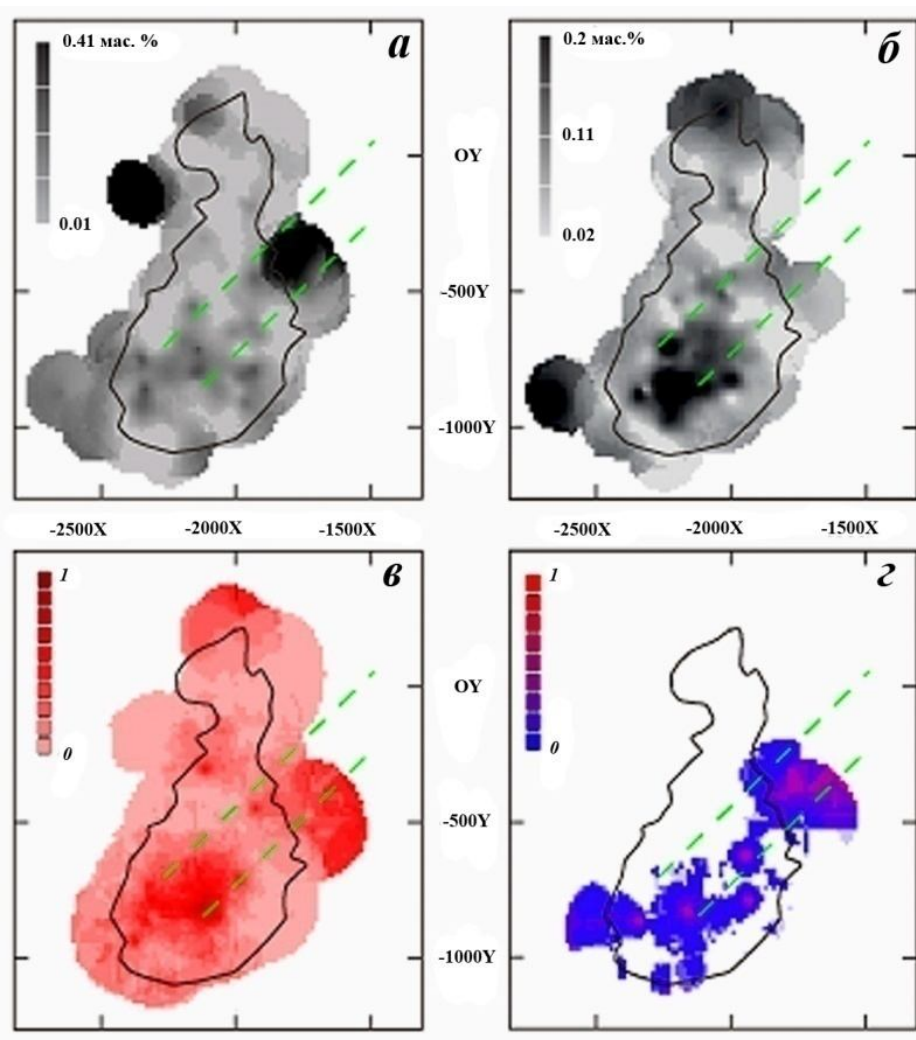


Рис. 7. Изменение содержания Ln_2O_3 в апатите (а), Sc_2O_3 в бадделеите (б), встречаемости пирохлора (в) и анкилита-(Ce) (г) в пределах рудного тела на горизонте – 170 м

Гидроксилapatит – главный породообразующий минерал большинства фоскоритов, который кристаллизуется позже форстерита, но раньше магнетита и кальцита. Микрозондовый

анализ этого минерала показывает постоянство его состава и сравнительно низкое содержание *REE* (рис. 7а), входящих в состав минерала по бритолитовой схеме $\text{Ca}^{2+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ln}^{3+} + \text{Si}^{4+}$. Кроме того, при переходе от глубоких горизонтов рудного тела к поверхности происходит обогащение апатита фтором, углеродом и редкоземельными элементами по схеме: $\text{Ca}^{2+} + \text{P}^{5+} + (\text{OH})^- \leftrightarrow \text{Ln}^{3+} + \text{C}^{4+} + (\text{F}^-)$. При самоочищении апатита от микропримесей, сопровождающем формирование поздних жильных карбонатитов, образуется вторичный анкилит-(Ce) (рис. 7г), подобно тому, как аналогичный процесс в магнетите приводит к образованию квинтинита, а в бадделеите – ёнаита [25, 33].

Бадделеит – акцессорный минерал большинства пород Ковдорского щелочно-ультраосновного комплекса, рудные концентрации которого связаны с фоскоритами. По данным микрозондового анализа, состав бадделеита характеризуется ничтожным содержанием примесных элементов, включая Sc (рис. 7б). В естественной последовательности пород от диопсидитов к фоскоритам и, далее, карбонатитам в составе бадделеита последовательно возрастает содержание Sc, Nb, Ta, Ti, Ca, но уменьшается количество Zr, Fe, Si и M при практически постоянном содержании Hf [25]. В пределах рудного тела состав бадделеита изменяется в соответствии с концентрической зональностью фоскорит-карбонатитового комплекса: повышенные концентрации микропримесей в бадделеите из краевой (Fe) и осевой (Sc) зон карбонатит-фоскоритовой трубки обусловлены изоморфными замещениями по схеме $2\text{Zr}^{4+} \leftrightarrow (\text{Nb}, \text{Ta})^{5+} + (\text{Sc}, \text{Fe})^{3+}$.

Цирконолит и пироксид – характерные вторичные минералы бадделеитсодержащих пород (рис. 7в), где они формируют частичные или полные псевдоморфозы по бадделеиту. В пределах рудного тела U-Ln-содержащие представители обоих минералов приурочены к карбонатсодержащим фоскоритам и карбонатитам осевой зоны, существенно повышая ее скандиеносность (по нашим оценкам – порядка 3.5 кт Sc_2O_3).

Кейвские редкоземельные рудопроявления

При анализе имеющиеся данные по редкоземельным проявлениям Кейвской структуры [11, 21, 22] были намечены 12 профилей, пересекающих наиболее перспективные участки, большинство из которых оказалось приурочено к зонам контакта щелочных гранитов и сланцево-гнейсовой толщи. По этим профилям отобраны 240 проб и проведено определение их валового химического состава и содержания *REE*, электронно-микроскопическое изучение и микрозондовый анализ всех установленных фаз, рентгенофазовый анализ и статистическая обработка полученных данных, позволяющие, с учетом имеющихся фондовых материалов и литературных данных, сделать определенные выводы о *REE*-потенциале этой территории (см. табл.).

В частности, подтверждена преимущественная приуроченность западно-кейвских *REE*-рудопроявлений к краевым зонам щелочногранитных массивов (рис. 8), где происходит существенное (в среднем, с 50–200 ppm до 3000–5000 ppm) возрастание суммарного содержания *REE*, – в особенности это касается лантаноидов средней и тяжелой подгрупп. В целом, содержание отдельных лантаноидов уменьшается с увеличением их массы, а содержание Y, сопоставимое в большинстве образцов с содержанием La, в наиболее богатых участках практически сравнивается с суммарным содержанием Ln.

При сопоставлении кривых изменения состава пород по указанным профилям фиксируется хорошая скоррелированность содержания *REE* и Zr, обусловленная преимущественной концентрацией этих металлов в составе акцессорного или порообразующего (до 20 об. %) циркона и сопутствующих *REE*-минералов (в порядке значимости): фергусонита-(Y), чевкинита-(Ce), монацита-(Ce), монацита-(La), монацита-(Nd), фторапатита, бастнезита-(Ce), пироксидора и ксенотима-(Y).

Переработка редкоземельного сырья

Апатит. Как известно [41], переработка в минеральные удобрения апатитового концентрата, получаемого из хибинских руд, возможна по серноокислотной, азотнокислотной и фосфорнокислотной схемам, которые различаются в интересующем нас аспекте видом REE-содержащего продукта: в первом случае это фосфогипс, во втором – азотно-фосфорнокислый раствор, в третьем – фосфорнокислый раствор. Серноокислотный способ переработки апатита наиболее распространен благодаря своей простоте. К тому же, в нем используется (по сути, утилизируется) дешевая серная кислота – побочный продукт медно-никелевого производства. В ходе разложения апатита серной кислотой образуется фосфогипс, в него уходит до 70% REE, их можно выделить дальнейшей переработкой.

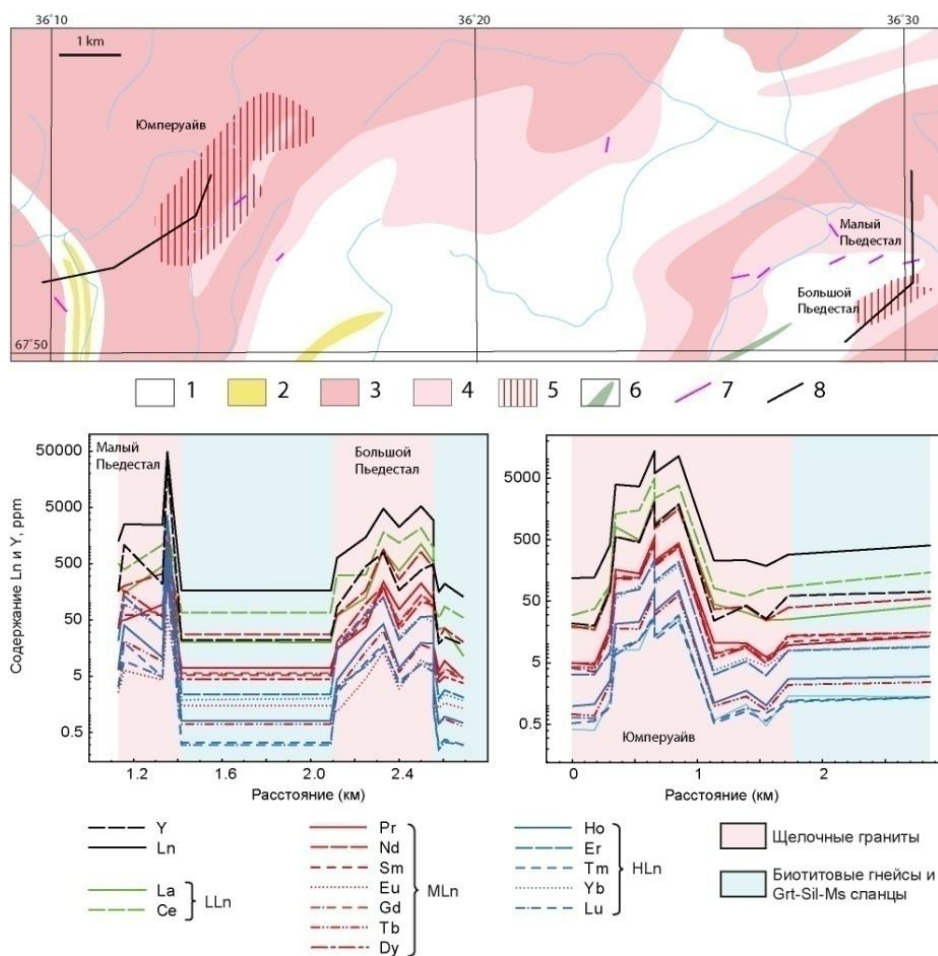
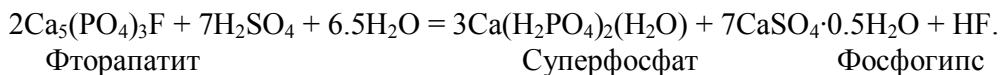


Рис. 8. Вариации содержания REE по профилям через Малеый Пьедастал – Болюшой Пьедастал и Юмперуайв – Макзабах:

1 – биотитовые гнейсы; 2 – глиноземистые сланцы Кейвской серии; 3 – щелочнополевошпатовые граниты; 4 – гнейсовидные щелочнополевошпатовые граниты и метасоматиты; 5 – участки обогащения гранитов REE; 6 – амфиболиты; 7 – гранитные пегматиты; 8 – профили опробования (геологическая схема – по [40], с упрощениями)

В этой связи можно полагать, что переработка обогащенного Sr и REE апатита сравнительно небольших месторождений (Олений Ручей, Партомчорр, Куэльпорр и др.) и даже рудопроявлений может оказаться более рентабельной, чем это представлялось до сих пор.

Единственное, что необходимо, – внести коррективы в процесс обогащения этих руд, где более тяжёлый и тонкозернистый апатит с повышенным содержанием указанных элементов находится совместно с «обыкновенным» апатитом, нередко выступая в качестве цемента для зерен последнего [28].

Лопарит. Вплоть до недавнего времени лопаритовый концентрат был единственным перерабатываемым в РФ редкоземельным сырьем. Поскольку все ценные составляющие лопарита легко извлекаются способом хлорирования, основное производство сосредоточено в Пермском крае с его гигантскими запасами хлоридов натрия и калия. В процессе переработки лопаритовый концентрат взаимодействует с газообразным хлором при 750–850 °С в присутствии угля или кокса: $\text{NaCeTi}_2\text{O}_6 + 6\text{Cl}_2 + 3\text{C} = 2\text{TiCl}_4 + \text{CeCl}_3 + \text{NaCl} + 3\text{CO}_2$. Следующий по важности сернокислотный способ переработки лопарита основан на его разложении концентрированной серной кислотой при температуре 150–250 °С: $2\text{NaCeTi}_2\text{O}_6 + 12\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 10\text{H}_2\text{O}$, – в ходе которого *REE* накапливаются в составе малорастворимых двойных сульфатов. Эта схема имеет хорошие перспективы для реализации в рамках Кольского химико-технологического комплекса, планы создания которого в настоящее время активно разрабатываются.

Эвдиалит. Ввиду неминуемого существенного уменьшения добычи ковдорского бадделеита из-за истощения его техногенных месторождений, ловозерский эвдиалит как источник Zr, безусловно, выходит на первое место в РФ. К преимуществам эвдиалита по сравнению с другими концентратами этого металла относятся, прежде всего, сравнительно легкая растворимость в кислотах, наличие важных сопутствующих компонентов, в частности *REE*, Nb и Ta, легкость добычи, наличие инфраструктуры и достаточно эффективных технологий переработки. Вскрытие эвдиалита можно осуществить по сернокислотной, солянокислотной, азотнокислотной и другим схемам [42].

Бадделеит. Несмотря на то, что ковдорский бадделеит – устойчивое соединение, содержащее ничтожное количество микропримесей (в основном, Hf, Nb, Sc и Fe), с глубиной он всё более и более интенсивно начинает замещаться пирохлором и цирконолитом. Последние концентрируют в себе разнообразные вредные примеси, включая уран и торий, но, в то же время, наследуют скандий от замещаемого бадделеита [25]. Удалить тонкие пленки и иззубренные вроски пирохлора и цирконолита из бадделеита механическим путем практически невозможно, однако, ввиду метамиктности и вообще значительно меньшей химической устойчивости таких включений, их можно растворить серной кислотой. Побочный продукт сернокислотной обработки бадделеитового концентрата – это сульфатный продукт, содержащий Hf, Zr, Nb, Sc, Fe и другие металлы, который можно рассматривать в качестве низкосортного редкометалльного сырья. Еще более эффективное отделение указанных элементов происходит при получении особо чистого диоксида циркония посредством спекания бадделеитового концентрата с оксидом или карбонатом кальция и последующего азотнокислого выщелачивания продуктов спекания [43]. В случае перехода ОАО «Ковдорский ГОК» на схему селективной добычи руд с целью обеспечения оптимального соотношения полезных компонентов при обогащении, извлечение скандия из продуктов доочистки бадделеитового концентрата может стать рентабельным. А перспективы извлечения этого металла только из руд т.н. «Аномальной зоны», сложенной карбонатсодержащими фоскоритами и карбонатитами, можно оценить величиной порядка 500 кг/год (18% от среднегодовой мировой добычи).

Циркон. Комплексные редкоземельно-цирконовые руды Западно-Кейвских проявлений имеет смысл перерабатывать по последовательной схеме, включающей сернокислотную обработку цирконового концентрата с целью удаления редкоземельных минералов и торита, и основную стадию переработки циркона в металлический цирконий или диоксид циркония (путем сплавления циркона с солями щелочноземельных металлов или реакции с галогенами). Растворы, обогащенные *REE* вследствие выщелачивания вростков фергусонита-(Y), чевкинита-(Ce), монацита-(Ce, La, Nd), апатита, бастнезита-(Ce) и других минералов из зерен циркона, могут быть выделены методом ионной флотации или другими способами.

Заключение

Проведенные исследования основных *REE*-месторождений и проявлений Мурманской области позволяют утверждать, что первоочередными объектами для технолого-экономической оценки извлечения *REE* или постановки разведочных работ должны стать разрабатываемые и готовящиеся к разработке хибинские апатитовые месторождения (Кукисвумчорр, Юкспор, Апатитовый Цирк, Расвумчор, Коашва, Ньоркпахк, Олений ручей, Партомчор); *REE*-Ti-Fe месторождение Африканда; эвдиалитовый комплекс Ловозерского массива в целом и месторождение Аллуайв, в частности; Zr-*REE* месторождения Юмперуайв и Большой Пьедестал в Западно-Кейвском массиве щелочных гранитов, а также окружающие их пегматитовые поля.

В фоскорит-карбонатитовых комплексах максимальное количество минеральных видов, концентрирующих *REE*, и максимальное содержание *REE* в главных минералах-концентраторах наблюдаются в доломитовых карбонатитах и доломит-магнетит-серпентиновых породах, что требует переоценки доломитовых карбонатитов как источников *REE* в пределах Ковдорского месторождения, участка Петяйян-Вара массива Вуориярви, карбонатитового поля Нама-Вара и др. Технологическая схема разработки доломитовых карбонатитов и других *REE*-месторождений должна опираться на результаты трёхмерного минералогического картирования, позволяющего оптимизировать селективную отработку руд и обеспечить тем самым комплексное использование недр.

Сопоставление существующих схем обогащения апатита, ринкита, лопарита, эвдиалита, бадделеита и циркона показало возможность использования наиболее дешевого серноокислотного варианта для всех этих случаев. В пользу такого выбора свидетельствуют необходимость утилизации серной кислоты на медно-никелевых комбинатах Мурманской области, разработка новой технологии извлечения *REE* из фосфогипса и наличие полезных побочных продуктов, в частности, сульфата титанила, являющегося прекурсором для производства титановых пигментов, дубителей, титанофосфатных, титаносиликатных и титанатных сорбентов.

Помимо приведенных результатов, из которых прямо вытекают практические следствия, был выявлен ряд фундаментальных закономерностей, важных для понимания общих принципов формирования рудоносных систем, минералообразования в щелочных системах и др., которые отражены в цитированных выше публикациях нашего коллектива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nomenclature of Inorganic Chemistry. IUPAC recommendations 2005 / N.G. Connelly, T. Damhus, R.M. Hartshorn, A.T. Hutton (eds) // Royal Society of Chemistry. London, 2005. 366 p.
2. Du X., Graedel T.E. Global in-use stocks of the rare Earth elements: a first estimate // Environ. Sci. Technol. 2011. Vol. 45. P. 4096–4101.
3. The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States: A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective / K.R. Long, B.S. Gosen, N.K. Van Foley, D. Cordier // Sinding-Larsen R., Wellmer F.-W. (eds) Non-Renewable Resource Issues: Geoscientific and Societal Challenges. Springer Netherlands, Dordrecht. 2012. P. 131–155.
4. Mineral commodity summaries. U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior, 2014. 199 p.
5. Humphries M. Rare Earth Elements: The Global Supply Chain. CRS Report for US Congress, December 16, 2013. Congressional Research Service, 2013. 27 p.
6. Critical Materials Strategy / D. Bauer, D. Diamond, J. Li, D. Sandalow, P. Telleen, B. Wanner. 2010. P. 171.
7. Kingsnorth D.J. Rare Earths: Facing New Challenges in the New Decade. SME Annual Meeting, 2010.
8. De Boer M.A., Lammertsma K. Scarcity of rare Earth elements. Chem. Sus. Chem. 2013. Vol. 6. P. 2045–2055.
9. Zepf V. Rare Earth Elements. A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use: Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. 157 p.
10. Самоорганизация рудных комплексов. Синергетические принципы прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых / Г.Ю. Иванюк, П.М. Горяинов, Я.А. Пахомовский, Н.Г. Коноплева, В.Н. Яковенчук, А.В. Базай, А.О. Калашников. М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2009. 392 с.
11. Храмов Д.Г. (ред.) Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2011 г. М.: Минерал, Аэрогеология, 2012. 333 p.
12. Ресурсный потенциал Кольской редкоземельной провинции / Н.Г. Коноплева, Г.Ю. Иванюк, Я.А. Пахомовский, В.Н. Яковенчук, А.О. Калашников, Ю.А. Михайлова, П.М. Горяинов // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона. Труды IX Всероссийской Ферсмановской научной сессии, посвященной 60-летию Геологического института КНЦ РАН. Апатиты, 2–3 апреля 2012 г. / ред. Ю.Л. Войтеховский. Апатиты: Изд-во K&M, 2012. С. 266–270.
13. Отчетный баланс запасов редкоземельных металлов по Мурманской области за 2013 год. Апатиты: Филиал по Мурманской области ФГУ «ТФИ по Северо-Западному федеральному округу», 2013.
14. Геохимическое исследование апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений с целью их оценки

- как комплексного редкометалльного сырья / Д.А. Минеев, С.М. Кравченко, Р.П. Тихоненкова, Е.А. Каменев, Н.Ф. Егорова, З.Т. Катаева, Р.И. Фарфель, Л.Б. Флерова. Москва, ИМГРЭ, 1975. В 2 томах. 274 и 74 с.
- 15.** Типохимизм ринкита и продуктов его изменения в Хибинском щелочном массиве (Кольский полуостров, Россия) / Н.Г. Коноплева, Г.Ю. Иванюк, Я.А. Пахомовский, В.Н. Яковенчук, Ю.А. Михайлова, Е.А. Селиванова // ЗРМО. 2014. № 5. С. 97–113.
- 16.** FODD: Fennoscandian Ore Deposit Database. 2011. (<http://geomaps2.gtk.fi/website/fodd/viewer.htm>).
- 17.** Отчет о предварительной разведке эвдиалит-лопаритовых и эвдиалитовых руд участка Аллуайв месторождения Чинглусуай: в 4-х книгах / М.Ю. Уткин, В.Н. Сухарев, О.П. Киричек, Г.А. Уткина, А.С. Лопатин, Л.Н. Кононова, А.В. Гордиенко, С. Сайков, Н.Г. Михаэлис. Апатиты: Филиал по Мурманской области ФГУ «ТФИ по Северо-Западному федеральному округу», 1995.
- 18.** Афанасьев Б.В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб.: Роза ветров, 2011. 224 с.
- 19.** Пастернок Н.И. и др. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на богатое иттриевое оруденение массива Сахарйок в 1998–1999 гг. Апатиты: ФГУ «ТФИ по Северо-западному федеральному округу», 1999.
- 20.** Zozulya D.R., Lyalina L.M., Eby N., Savchenko Y.E. Ore geochemistry, zircon mineralogy, and genesis of the Sakharjok Y-Zr deposit, Kola Peninsula, Russia // *Geology of Ore Deposits*. 2012. Vol. 54. P. 81–98.
- 21.** Чухина Т.С. и др. Отчет о ревизионных работах на редкие земли и редкие металлы, проведенных в 1962 г. в районе Северо-западных Кейв Ловозерского района Мурманской области. Апатиты: Филиал по Мурманской области ФГУ «ТФИ по Северо-Западному федеральному округу», 1963.
- 22.** Богатырев В.Л., Васильев Ю.А., Гаскельберг В.Г. Отчет о результатах поисковых работ на редкие металлы, проведенных в 1961–1964 гг. в районе Ельских озер и г. Лаврентьевской (Ловозерский район Мурманской области). Апатиты, 1967. Т. 1. 240 с.
- 23.** Химическая переработка минеральных концентратов Кольского полуострова / С.Г. Федоров, А.И. Николаев, Ю.Е. Брыляков, Л.Г. Герасимова, Н.Я. Васильева. Апатиты, 2003. 198 с.
- 24.** Rare earth elements in phoscorites and carbonatites of the Devonian Kola Alkaline Province, Russia: examples from Kovdor, Khibina, Vuoriyarvi and Turij Mys complexes / A.N. Zaitsev, T.C. Williams, T.E. Jeffries, S. Strekopytov, J. Moutte, O.V. Ivashchenkova, J. Spratt, S.V. Petrov, F. Wall, R. Seltmann, A.P. Borozdin // *Ore Geol Rev*. 2014 (doi: 10.1016/j.oregeorev. 2014.02.002).
- 25.** Трехмерное минералогическое картирование Ковдорского комплексного месторождения магнетита, апатита и бадделеита / Г.Ю. Иванюк, А.О. Калашников, В.А. Сохарев, Я.А. Пахомовский, А.В. Базай, Ю.А. Михайлова, Н.Г. Коноплева, В.Н. Яковенчук, П.М. Горяинов // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2013. № 4. С. 44–57.
- 26.** Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Яковенчук В.Н. Минералы группы эвдиалита в породах Ловозерского расслоенного комплекса гор Карнасурт и Кедыквырпахк // ЗРМО. 2014. Т. 143, № 4. С. 73–90.
- 27.** Typomorphism of fluorapatite in the Khibina alkaline pluton, Kola Peninsula / N.G. Konopleva, G. Yu. Ivanyuk, Ya.A. Pakhomovsky, V.N. Yakovenchuk, Yu.A. Mikhailova // *Geology of Ore Deposits*. 2014. Vol. 56, № 7. P. 1–13.
- 28.** Типоморфизм фторапатита в Хибинском щелочном массиве (Кольский полуостров) / Н.Г. Коноплева, Г.Ю. Иванюк, Я.А. Пахомовский, В.Н. Яковенчук, Ю.А. Михайлова // ЗРМО. 2013. № 3. С. 65–83.
- 29.** Минералы группы цирконолита из фенитизированных ксенолитов в нефелиновых сиенитах Хибинского и Ловозерского массивов (Кольский полуостров) / Ю.П. Меньшиков, Ю.А. Михайлова, Я.А. Пахомовский, В.Н. Яковенчук, Г.Ю. Иванюк // ЗРМО. 2014. №3. С. 60–72.
- 30.** Пахомовский Я.А., Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н. Лопарит-(Ce) в породах ловозерского расслоенного комплекса г. Карнасурт и Кедыквырпахк // ЗРМО. 2014. Т. 143, № 1. С. 68–87.
- 31.** Self-organization of the Khibina alkaline massif (Kola Peninsula, Russia) / G. Ivanyuk, V. Yakovenchuk, Ya. Pakhomovsky, N. Konoplyova, A. Kalashnikov, J. Mikhailova, P. Goryainov // *Earth Sciences* (Ed. Imran Ahmad Dar). INTECH, 2012. P. 131–156.
- 32.** Pakhomovsky Ya.A., Ivanyuk G.Y., Yakovenchuk V.N. Loparite-(Ce) in rocks of the Lovozero layered complex at Mt. Kamasurt and Mt. Kedykvyrphkh // *Geology of Ore Deposits*. 2014. Vol. 56. No. 8. P. 1–14.
- 33.** Ivanyuk G.Yu., Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky Ya.A. Where are new minerals hiding? The main features of rare mineral localization within alkaline massifs // *Minerals as Advanced Materials II* (Ed. S.V. Krivovichev). Springer-Verlag, 2012. P. 13–24.
- 34.** Kihlmanite-(Ce), $\text{Ce}_2\text{TiO}_2[\text{SiO}_4](\text{HCO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})$, a new rare earth mineral from a pegmatite of the Khibina alkaline massif, Kola Peninsula, Russia / V.N. Yakovenchuk, S.V. Krivovichev, G.Y. Ivanyuk, Ya.A. Pakhomovsky, E.A. Selivanova, E.A. Zhitova, G.O. Kalashnikova, A.A. Zolotarev, J.A. Mikhailova, G.I. Kadyrova // *Mineralogical Magazine*. 2014. Vol. 78, № 3. P. 483–496.
- 35.** Калашников А.О. Горяинов П.М. Фрактальные свойства рельефа как поисковый признак // *Разведка и охрана недр*. 2013. №2. С. 25–30.
- 36.** Goryainov P.M., Ivanyuk G.Yu., Kalashnikov A.O. Topography formation as an element of lithospheric self-organization // *Russian geology and geophysics*. 2013. Vol. 54. P. 1071–1082.
- 37.** Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю., Калашников А.О. Рельефообразование как элемент самоорганизации литосферы // *Геология и геофизика*. 2013. № 9. С. 1366–1380.
- 38.** Закономерности распределения редкоземельных металлов в щелочных гранитах и апогнейсовых метасоматитах Западных Кейв / Е.Н. Фомина, И.Р. Елизарова, А.О. Калашников, Ю.А. Михайлова, Я.А. Пахомовский, В.Н. Яковенчук, Г.Ю. Иванюк // *Геология и полезные ископаемые Кольского региона*. Апатиты: Изд-во К & М, 2013. С. 181–185.
- 39.** Burakov B.E., Ojovan M.I., Lee W.E. Crystalline Materials for Actinide Immobilization. Imperial College Press, Materials for Engineering, 2010. Vol. 1. 197 p.
- 40.** Гаскельберг Л.А. и др. Сводный отчет о геологическом доизучении Кейвской структуры и составлении обновленной геологической карты масштаба 1:200000; поисково-разведочных и ревизионных работ на слюду-мусковит в Центральном слюдоносном районе, проведенных Кейвской и Восточно-Понойской партиями в 1971–1978 гг. в Ловозерском районе Мурманской области в пределах листов Q-36-VI, Q-37-I-IV, VII-XI. Апатиты, 1978. 329 с.
- 41.** Маслобоев В.А., Лебедев В.Н. Редкометалльное сырье Кольского полуострова и проблемы его комплексной переработки. Апатиты, 1991. 152 с.
- 42.** Некоторые аспекты кислотной переработки эвдиалита // *Цветные металлы*. 2011. №11. С. 25–29.
- 43.** Лебедев В.Н. Выделение и очистка скандия при переработке бадделеитового концентрата / В.И. Захаров, Г.С. Скиба, А.В. Соловьев, В.Н. Лебедев, Д.В. Майоров // *Химическая технология*. 2007. Т. 8, № 1. С. 33–37.

Сведения об авторах

Базай Айя Валерьевна – к.г.-м.н., научный сотрудник ГИ КНЦ РАН, младший научный сотрудник ЦНМ КНЦ РАН; e-mail: a.bazai@mail.ru

Горяинов Павел Михайлович – д.г.-м.н., главный научный сотрудник ГИ КНЦ РАН; e-mail: pgor@geoksc.apatity.ru

Елизарова Ирина Рудольфовна – к.т.н., старший научный сотрудник ИХТРЭМС КНЦ РАН; e-mail: elizarir@chemy.kolasc.net.ru

Иванюк Григорий Юрьевич – д.г.-м.н., зав. лаб. ГИ КНЦ РАН, старший научный сотрудник ЦНМ КНЦ РАН; e-mail: ivanyuk@geoksc.apatity.ru

Калашиников Андрей Олегович – к.г.-м.н., научный сотрудник ГИ КНЦ РАН; e-mail: kalashikov@geoksc.apatity.ru

Коноплёва Наталья Геннадьевна – к.г.-м.н., младший научный сотрудник ЦНМ КНЦ РАН; e-mail: konoplyova55@mail.ru

Михайлова Юлия Александровна – к.г.-м.н., научный сотрудник ГИ КНЦ РАН, младший научный сотрудник ЦНМ КНЦ РАН; e-mail: ylya_korchak@mail.ru

Пахомовский Яков Алексеевич – к.г.-м.н., зав. лаб. ГИ КНЦ РАН, научный сотрудник ЦНМ КНЦ РАН; e-mail: pakhom@geoksc.apatity.ru

Яковенчук Виктор Нестерович – к.г.-м.н., старший научный сотрудник ГИ КНЦ РАН, научный сотрудник ЦНМ КНЦ РАН; e-mail: yakovenchuk@geoksc.apatity.ru