

УДК 553.493.67. (470.22)

КАРЕЛЬСКИЙ ГРАНАТ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК СКАНДИЯ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

А. М. Ручьев

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

На территории Республики Карелия с приемлемыми для развития горнодобывающей промышленности географо-экономическими условиями расположены многочисленные месторождения и проявления гранатовых руд, в которых сосредоточено не менее 49,2 млн т пиральспитового граната. Результаты изучения микрокомпонентного состава этого минерала свидетельствуют о высоком содержании в нем скандия и редкоземельных металлов (иттрия и лантаноидов). Наиболее обогащен ими метаморфогенный гранат сиалических горных пород. Ему свойственны промышленно значимое содержание скандия (Sc_2O_3 – 211–521 г/т) и высокоперспективный состав сопутствующих редкоземельных металлов (содержание их оксидов 245–608 г/т, из них иттриевой группы – 85,5–99,8 %). По содержанию скандия гранат превосходит признанные крупнообъемные источники этого металла, такие как красные шламы и силикатные хвосты обогащения титаномагнетитовых руд. Оцененные на некоторых месторождениях и проявлениях граната прогнозные ресурсы Sc_2O_3 , варьирующие от 0,7 до 695 т, соразмерны запасам мелких месторождений. Ресурсный потенциал геологически сходных и пространственно сближенных объектов кемско-беломорской группы соответствует рангу среднего по запасам месторождения скандия. Для увеличения рудной базы редких металлов целесообразны ревизия известных гранатовых объектов и мероприятия по выявлению новых. Наиболее подходящими для первоочередных поисково-оценочных работ представляются участки развития гранатсодержащих разновидностей сиалических пород беломорского комплекса. Необходимо изучение микрокомпонентного состава гранатовых руд, локализованных в мафических породах. Объективные предпосылки позволяют оптимистически оценивать карельский гранат как новый перспективный комплексный нерадиоактивный источник скандия и сопутствующих редкоземельных металлов иттриевой группы. Для надлежащего обоснования возможности использования граната в качестве руды этих металлов следует продолжить всестороннее геологическое и технологическое изучение карельских гранатовых объектов.

Ключевые слова: гранат; редкие металлы; редкоземельные металлы; скандий; иттрий.

A. M. Ruchyov. KARELIAN GARNET AS A PROMISING SOURCE OF SCANDIUM AND RARE-EARTH METALS

Many garnet ore deposits and occurrences, in which at least 49.2 M t of pyralispitic garnet are concentrated, are located in Karelia in a favourable geographic, mining and economic environment. The study of the microcomponent composition of garnet shows that it contains high scandium and rare-earth metal (yttrium and lanthanoids) concentrations. These elements are most abundant in metamorphogenetic garnet from sialic rocks. It

contains commercial-scale scandium (Sc_2O_3 – 211–521 g/t) and promising secondary rare-earth metals concentrations (their oxide content is 245–608 g/t, in which the yttrium group contributes 85.5–99.8 %). Garnet contains more scandium than generally recognized scandium sources such as red sludge and silicate tailings in titanomagnetite ore processing. The predicted Sc_2O_3 resources of some garnet deposits and occurrences, varying from 0.7 to 695 t, are commensurable with those of small deposits. The resources of geologically similar and closely-spaced localities in the Kem-Belomorsk group match those of a medium-size scandium deposit. To increase the ore base of rare metals, known garnet deposits and occurrences should be re-appraised and more localities prospected. Garnetiferous varieties of sialic rocks from the Belomorian complex seem to be the most suitable for priority prospecting and appraisal. The microcomponent composition of garnet ore in mafic rocks should be studied. There are some objective prerequisites for commending Karelian garnet as a new promising complex non-radioactive source of scandium and secondary rare-earth yttrium-group metals. Further comprehensive geological and technological study of garnet localities is needed to provide arguments in favour of the possible use of Karelian garnet as the ore of these metals.

Keywords: garnet; rare metals; rare-earth metals; scandium; yttrium.

Введение

Редкие металлы (РМ) используются во многих отраслях современной промышленности (см. обзоры: [Михайлов, 2010, 2014; Бортников и др., 2016 и др.]), а объемы их производства и потребления, ставшие показателями уровня научно-технического прогресса, рассматриваются [Мелентьев, 2011] в качестве индикаторов экономической и национальной безопасности государств.

Устойчивая тенденция возрастания значимости РМ предопределила необходимость увеличения и совершенствования их минерально-сырьевой базы (МСБ). Распоряжением Правительства Российской Федерации № 50-р 16 января 1996 г. утвержден перечень стратегического минерального сырья и предписано первоочередное направление средств на развитие сырьевой базы его дефицитных видов. Перечень включает девятнадцать редких металлов, в том числе и рассматриваемые далее скандий и редкоземельные металлы иттриевой группы (YРЗМ), к которой относятся иттрий и лантаноиды (Ln) от самария до лютеция включительно [Методические..., 2007, табл. 1].

Особенности МСБ редкоземельных металлов (РЗМ) в общих чертах сводятся к следующему. Россия обладает большим сырьевым потенциалом РЗМ (на 01.01.2015 г. балансовые запасы их оксидов – 27,2 млн т, ресурсы – 46,7 млн т), но промышленные запасы категорий А+В+С₁ эксплуатируемых и осваиваемых месторождений, из руд которых возможно извлечение РЗМ, составляют чуть более 3 млн т [Государственный..., 2015]. В учетных запасах доминируют лантаноиды цериевой группы. Неоднократно отмечался дефицит

источников YРЗМ. Так, через десять лет после утверждения перечня констатировалось [Середин и др., 2006, с. 37]: «...удовлетворение спроса на иттрий и лантаноиды иттриевой группы за счет отработки известных в стране месторождений в настоящее время невозможно».

В структуре МСБ нет собственно редкоземельных месторождений [Кременецкий и др., 2011], запасы и ресурсы обеспечиваются РЗМ, присутствующими в качестве сопутствующих компонентов в комплексных природных и техногенных рудах. Большинству отечественных месторождений в той или иной мере присущи снижающие их инвестиционную привлекательность особенности: невысокое содержание полезных компонентов; трудная обогатимость и радиоактивность руд; их состав, предопределяющий получение металлов в пропорциях, не отвечающих потребностям; неблагоприятные географо-экономические и горнотехнические условия [Кременецкий, Калиш, 2014].

Разработанная в 2004–2005 годах стратегия развития МСБ РМ на пятнадцатилетний период предусматривала выявление и оценку небольших компактных объектов с мономинеральными легкообогатимыми рудами YРЗМ [Бавлов и др., 2006]. Однако и по прошествии ряда лет отмечалось [Кременецкий и др., 2011; Кременецкий, Архипова, 2013] отсутствие в структуре МСБ месторождений YРЗМ, которые могли бы быть востребованы промышленностью.

Особенности МСБ Sc обусловлены его принадлежностью к группе рассеянных элементов. Скандий в качестве изоморфной примеси содержится во многих минералах и, как сопутствующий компонент, присутствует в рудах ряда полезных ископаемых, из которых может извлекаться. Балансовые запасы Sc по состоянию

на 01.01.2004 г. учитывались в Сосьвинском бокситовом, Томторском редкометалльном, Шерловогорском, Правоурмийском, Фестивальном оловянных месторождениях и составляли около 1,3 тыс. т Sc_2O_3 , а утвержденные ГКЗ запасы Sc на Туганском Zr-Ti месторождении на балансе не числились [Быховский и др., 2007]. Прогнозные ресурсы Sc характеризовались как «огромные». Обращалось внимание на необходимость оценки и утверждения запасов Sc в месторождениях различных типов, а также – на актуальность проблемы совершенствования технологий его извлечения из руд. Был сделан вывод, что МСБ Sc достаточна для удовлетворения любых потребностей [Там же]. Однако нельзя не отметить, что многим природным и техногенным источникам Sc присущи негативные особенности, сходные с указанными для месторождений РЗМ.

В российском списке «критических» металлов Sc и РЗМ занимают высокорейтинговые места [Бортников и др., 2016], то есть до сих пор остаются проблемными, что в значительной мере обусловлено состоянием их МСБ. Одно из мероприятий по ее совершенствованию – поиски новых природных источников Sc и РЗМ, в частности «нетрадиционных». Выявление последних важно, так как небезосновательно предполагается [Наумов, 2008], что в будущем спрос на некоторые РЗМ уже не удастся удовлетворить за счет увеличения добычи руд «сегодняшнего» минералогического состава.

Возможно ли выявление промышленно значимых рудных объектов с иттриевоземельной и скандиевой специализацией на территории Республики Карелия, географо-экономические условия которой вполне приемлемы для развития горнодобывающей промышленности? Для оптимистичного ответа на этот вопрос есть следующие предпосылки.

В Карелии известны многочисленные разномасштабные проявления РЗМ [Минерально-сырьевая..., 2006; Государственный..., 2017 и др.] различных рудно-формационных и минеральных типов [Иващенко, 2016], что в дальнейшем позволит сделать выбор в пользу объектов, заслуживающих более пристального внимания.

Скандий – характерный сопутствующий компонент титаномагнетитовых и ильменитовых руд [Борисенко и др., 1997; Быховский и др., 2008], поэтому к его возможным источникам с высокой вероятностью могут быть отнесены комплексные (Fe, Ti, V, Co, Cu, Au, Pt, Pd) руды Пудожгорского (в отношении скандия этот объект уже был отмечен [Михайлов, 2010, с. 190]),

Койкарского, Викшеозерского месторождений и проявлений в габброидах Койкарско-Святнаволоцкого силла.

В Кааламском клинопироксенит-габбронорит-диоритовом интрузивном комплексе заслуживают внимания ультрамафиты (метапироксениты) с благороднометалльной и медно-никелевой минерализацией, содержащие до 164 г/т Sc_2O_3 .

Предполагалась возможность обнаружения в Карело-Кольском регионе Sc-Y-гранатов [Мелентьев, 2013]. Пиральспитовый гранат, широко распространенный метаморфогенный породообразующий минерал, предложен [Ручьев, 2016, 2017] в качестве «нетрадиционного» перспективного¹ комплексного источника Sc и РЗМ.

Карельский гранат, начиная с 30-х годов прошлого века, рассматривался как природный материал, пригодный для производства абразивов и использования в иных целях [Щипцов и др., 2009]. В связи с этим проводились работы по созданию его рудной базы. Промышленно значимое содержание граната в разнообразных горных породах выявлено в Лоухском (месторождение «Нигрозеро»; проявления «Левин Бор», «Западная Плотина», «Варацкое», «Слюдозерское» («Запарногубское»), «Энгозерское» (участок «Гранатовый» или «49 км»), «Высота-181» («Шариваара»), «Униярви» и др.), Кемском (месторождения «Тербеостров», «Еловый Наволок», «Солохина Луда»; проявления «Кислячиха», «Кожручейское»), Беломорском (проявления «Кузостровское», «Удинское», «Слюдяноборское»), Питкярантском (месторождение «Кительское») административном районах. Судя по опубликованным сведениям [Минерально-сырьевая..., 2006; Щипцов и др., 2009; Государственный..., 2017 и др.], на оцененных с различной детальностью объектах запасы и прогнозные ресурсы граната в сумме составляют не менее 49,2 млн т.

Обоснована возможность извлечения качественного концентрата граната из его руд с использованием простых технологических схем (последовательные операции дробления, грохочения, магнитной и электромагнитной сепарации, гравитационного разделения) [Качан, 1935; Щипцов и др., 2009 и др.].

¹ Под перспективными, в соответствии с используемой классификацией [Быховский, 2014], здесь и далее подразумеваются природные и техногенные образования, промышленная ценность которых определена по предварительным технико-экономическим расчетам или по экспертной оценке, запасы (ресурсы) достоверно не установлены и часто не апробированы, технологическая изученность нередко основана на непредставительных пробах или не завершена.

В ходе предшествующих работ в Западном Беломорье и Северном Приладожье получена первая информация о содержании РМ в гранате из различных горных пород, в частности, из жедрититов месторождения Тербеостров.

Наличие сведений о микрокомпонентном составе и сырьевой базе карельского граната способствовало изучению этого минерала как возможной комплексной руды Sc и РЗМ, первые результаты которого рассматриваются далее.

Методика

Одной из важных задач выполненных исследований было получение новой более полной информации о содержании Sc и РЗМ в гранате.

Работы по подготовке проб и определению их состава выполнены в Аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН (Петрозаводск). Мономинеральные фракции граната выделены из 102 образцов горных пород массой 0,3–60 кг с применением электромагнитной и магнитной сепарации, ультразвуковой обработки, тяжелых жидкостей.

Содержание макрокомпонентов в мономинеральных фракциях граната определено методами количественного химического анализа [Пономарев, 1961], содержание K и Na – атомно-абсорбционной спектрометрией. Аналитики – В. Л. Утицина, А. И. Полищук, В. А. Кукина, Н. В. Питкя, Г. К. Пунка, Н. К. Екимова, В. А. Доильцина. Макрокомпонентный состав минеральных индивидов граната в шлифах и аншлифах определен рентгеноспектральным методом (EMPA) с помощью энергодисперсионного микроанализатора «INCA Eneergy 350» на базе электронного микроскопа «VEGA II LSH», аналитик – А. Н. Терновой.

Содержание микрокомпонентов определено по ранее описанным методикам [Светов и др., 2015]: в мономинеральных концентратах – масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) с использованием квадрупольного масс-спектрометра XSERIES 2 (Thermo Fisher Scientific), в минеральных индивидах – масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP MS) с применением приставки UP-266 MACRO (New Wave Research) к масс-спектрометру. Аналитики – А. С. Парамонов, В. Л. Утицина, М. В. Эхова.

Фактический материал и его обсуждение

Большинство известных в Карелии промышленно значимых гранатовых объектов локализовано в метаморфических образованиях беломорского комплекса. Сведения о содержании

Sc, Y, Yb в горных породах и минералах беломорид, полученные в результате предшествующих исследований [Слюдоносные..., 1976 и др.], позволили сосредоточить внимание на разновидностях сиалических горных пород, гранат которых – главный минерал-концентратор РМ, характеризующийся наибольшим их содержанием.

В первую очередь к таким породам относятся метаморфические разновидности гнейсов и сланцев чупинской свиты (толщи), классифицируемые с учетом их возрастных, генетических соотношений и фундаментальных представлений о минеральном парагенезисе и естественной минеральной фации (рис. 1).

Повышенное содержание РМ ожидалось также в гранате из беломорид кемско-беломорской площади и метаморфических пород палкъярвинской свиты ладожской серии нижнего протерозоя (район месторождения «Кительское»).

Новые фактические данные о химическом составе граната (табл. 1) из чупинских гнейсов, опробованных на площадях Лоушского, Плотинского, Малиноваракского, Тэдинского пегматитовых полей, граната из месторождения «Кительское» и обрамляющих его силлиманит-гранат-биотитовых пород, граната из жедрититов месторождения «Тербеостров» подтверждают высокое содержание в этом минерале Sc и Y, характеризуют весь спектр Ln, позволяют судить о соотношении групп РЗМ. Обогащенность редкими металлами граната из сиалических пород, преобладающих на месторождениях и проявлениях кемско-беломорской группы, подтверждается ранее опубликованными данными по проявлению «Слюдяной Бор» (табл. 1).

Новые сведения о среднем содержании оксидов РМ в гранате (табл. 1) позволяют определить главные и сопутствующие полезные компоненты. Для руд Sc единых стандартов нет, содержание 0,01–0,05 % Sc₂O₃ считается значительным, 0,01 % – минимальным промышленным, но попутно Sc извлекают и из гораздо более бедных руд [Михайлов, 2010]. В гранате всех изучавшихся объектов среднее содержание Sc₂O₃ превышает минимальное промышленное и может оцениваться как «значительное», а суммарное количество оксидов РЗМ – меньше 0,2 %, принимаемых за их минимальное промышленное содержание в рудах [Кременецкий, Архипова, 2013]. Следовательно, в гранате Sc является главным полезным компонентом, а РЗМ – сопутствующими.

По содержанию U и Th мономинеральные фракции граната (табл. 1) характеризуются

Седиментогенез



Рис. 1. Схема развития минеральных фаций и минеральных парагенезисов гнейсов

Доминирующие разновидности выделены жирным шрифтом; минеральные парагенезисы: гнейс-1 – $\text{Grt}^{26 \pm 10}_{72 \pm 10} + \text{Bt}_{37 \pm 4} + \text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Gr} + \text{рудный}$; гнейс-2 – $\text{Ky} + \text{Grt}^{30 \pm 9}_{70 \pm 4} + \text{Bt}_{38 \pm 4} \pm \text{Kfs} (\text{Or}) + \text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Gr} + \text{рудный}$; гнейс-3 – $\text{Ky} + \text{Grt}^{23 \pm 4}_{75 \pm 4} + \text{Bt}_{39 \pm 4} + \text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Gr} + \text{рудный}$; гнейсы-4₁, -4₂, -4/3₁, -4/3₂ – $\pm \text{Ky} \pm \text{Grt}^{18 \pm 4}_{80 \pm 5} + \text{Ms} + \text{Bt}_{46} + \text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Gr} + \text{рудный}$. Символы минералов: Bt – биотит, Grt – гранат, Qtz – кварц, Ky – кианит, Kfs – калиевый полевой шпат, Or – ортоклаз, Pl – плагиоклаз, Ms – мусковит, Gr – графит; индексы после символов: подстрочные – средний коэффициент общей железистости и его стандартное отклонение, надстрочные – средняя доля пиропового минала в гранате и ее стандартное отклонение

как низко- или слаборадиоактивные (гранат гнейса-3 и месторождения «Кительское»). Гранатовым концентратам свойственны близкие к фоновым значения удельной эффективной активности естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) – 13–19 Бк/кг [Щипцов и др., 2009].

Сравнение граната с иными крупнообъемными источниками Sc, Y, Ln, сходными с ним по примесной природе РМ, такими как красные шламы (Sc – 81,8 г/т, РЗМ – 1177 г/т, Y РЗМ – 377 г/т (32 % от РЗМ), Ga – 145 г/т [Кашеев и др., 2014, табл. 1]), хибинский апатитовый концентрат (РЗМ – 8497,63 г/т, Y РЗМ – 761,42 г/т (9 % от РЗМ) [Сарычев и др., 2013, табл. 1]), фосфогипс (РЗМ – 4094,97 г/т, Y РЗМ – 327,93 г/т (8 % от РЗМ) [Там же]), пироксеновые хвосты обогащения титаномагнетитовых руд качканарского типа (Sc – 100–130 г/т, среднее содержание 115 г/т [Борисенко и др., 1997]), может быть выполнено различными способами.

Для сопоставления различных источников РМ используется показатель «ценность тонны руды» (суммарная стоимость потенциальных товарных продуктов, которые из нее могут быть получены). Результаты расчетов (табл. 2) свидетельствуют, что по этому показателю гранат из сиалических пород, благодаря высокому содержанию наиболее дорогостоящего Sc, значительно превосходит другие рассматриваемые источники РМ. Гранат из жедрититов месторождения «Тербеостров» по своей «ценности» уступает только пироксену из хвостов обогащения руд качканарского типа. «Ценность» сопутствующих дефицитных Y РЗМ в тонне граната больше, чем в красном шламе, но меньше, чем

в хибинском апатите и фосфогипсе (табл. 2), однако применительно к РЗМ использованный показатель не вполне соответствует современным подходам к сравнению их источников.

Для первичной оценки редкоземельного рудного сырья рекомендовано [Середин, 2010] использовать соотношение в нем групп дефицитных (Nd, Tb, Dy, Y), потенциально дефицитных (Eu, Er) и избыточных (Ce, Ho, Tm, Yb, Lu) компонентов, выделенных с учетом прогноза производства и потребления индивидуальных РЗМ. На графике в координатах $D_{\text{деф}}/K_{\text{пер}}$, где $K_{\text{пер}}$ – коэффициент перспективности состава руд, а $D_{\text{деф}}$ – доля дефицитных и потенциально дефицитных компонентов в составе РЗМ, фигуративные точки, характеризующие соотношение групп металлов в гранате, расположены в поле высокоперспективных рудных объектов, тогда как красные шламы по соотношению РЗМ соответствуют перспективным, апатит и фосфогипс – неперспективным рудам (рис. 2).

Судя по использованным для сравнения оценочным показателям, гранат может оказаться вполне конкурентоспособным по отношению к тем крупнообъемным источникам РМ, в которых заключена наибольшая часть отечественных запасов и ресурсов Sc и РЗМ.

Таким образом, микрокомпонентный состав граната вполне позволяет рассматривать этот минерал как комплексный нерадиоактивный источник РМ с промышленно значимым содержанием скандия (145–521 г/т Sc_2O_3) в качестве главного полезного компонента и высокоперспективным составом сопутствующих РЗМ с очень высокой долей Y РЗМ (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав граната

Компонент	Среднее содержание (макрокомпоненты – масс. %, микрокомпоненты – г/т)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	41,23	39,82	40,22	39,70	39,63	38,86	42,17	40,70	41,69	–	36,57
TiO ₂	0,11	0,12	0,14	0,07	0,12	0	0,82	0,08	–	–	–
Al ₂ O ₃	20,49	21,28	21,21	21,07	20,93	22,12	18,28	20,35	20,48	–	–
Fe ₂ O ₃	0,73	0,48	0,81	0,58	1,05	–	2,97	–	–	–	20,95
FeO	26,49	27,72	27,33	28,96	29,49	29,83	21,61	30,44	26,77	–	35,10
MnO	1,03	0,78	1,16	1,77	1,61	1,31	0,43	0,28	0,21	–	2,35
MgO	6,02	6,82	5,76	5,02	4,40	5,66	9,75	5,22	8,1	–	4,10
CaO	3,18	2,27	2,66	2,23	2,52	2,29	2,83	3,12	2,75	–	0,92
Na ₂ O	0,20	0,13	0,18	0,19	0,19	–	0,49	–	–	–	–
K ₂ O	0,21	0,15	0,19	0,18	0,19	–	0,37	–	–	–	–
H ₂ O	0,15	0,09	0,12	0,06	0,09	–	–	–	–	–	–
Σ	99,82	99,80	99,79	99,83	100,21	100,07	99,72	100,00	100,00	–	99,99
Sc ₂ O ₃	224,39	211,04	289,91	286,62	306,93	210,66	144,84	–	–	521,49	271,84
Y ₂ O ₃	195,58	141,71	218,66	314,68	309,53	246,41	229,51	860,36	1700,40	495,26	385,33
La ₂ O ₃	4,14	4,70	16,20	4,03	2,77	0,06	0,83	0,04	0,01	–	5,80
Ce ₂ O ₃	8,23	9,97	30,04	8,04	5,61	0,14	1,34	0,09	0,05	–	9,79
Pr ₂ O ₃	1,14	1,31	4,02	1,12	0,76	0,13	0,30	–	–	–	1,42
Nd ₂ O ₃	5,00	5,58	16,33	4,74	3,42	0,46	1,44	0,19	0,13	–	5,67
Sm ₂ O ₃	2,60	2,59	4,22	2,02	1,82	1,61	1,22	1,55	0,69	–	1,79
Eu ₂ O ₃	0,37	0,29	0,46	0,24	0,26	0,27	0,48	1,19	0,52	–	0,35
Gd ₂ O ₃	11,41	11,03	12,27	10,81	11,13	16,33	11,13	28,41	14,98	–	8,27
Tb ₂ O ₃	3,45	3,15	3,84	4,33	4,47	5,87	3,81	–	–	–	3,96
Dy ₂ O ₃	29,83	24,60	32,80	43,69	42,91	42,66	35,38	84,12	137,43	–	48,26
Ho ₂ O ₃	6,83	5,06	7,46	10,79	10,17	9,37	8,79	–	–	–	13,77
Er ₂ O ₃	21,82	15,63	24,15	34,88	33,34	25,80	24,22	82,44	189,25	–	50,30
Tm ₂ O ₃	3,18	2,23	3,52	5,21	4,85	4,09	2,99	–	–	–	7,98
Yb ₂ O ₃	21,71	15,41	24,70	35,17	34,17	27,76	16,73	–	–	68,32	57,35
Lu ₂ O ₃	3,09	2,19	3,54	5,08	4,80	4,83	2,63	–	–	–	8,15
ΣLn ₂ O ₃	122,80	103,75	183,56	170,16	160,49	139,39	111,31	198,04	343,06	–	222,85
Σ ^Y Ln ₂ O ₃	104,29	82,18	116,97	152,22	147,93	138,60	107,40	197,73	342,87	–	200,17
^Y PЗМ	299,87	223,89	335,63	466,91	457,45	385,01	336,91	1058,08	2043,26	–	585,50
РЗМ	318,38	245,46	402,22	484,84	470,02	385,80	340,82	1058,40	2043,45	>564	608,18
^Y РЗМ, %	93,79	90,89	85,51	96,02	97,18	99,81	98,94	99,97	99,99	–	96,19
Th	0,96	1,03	3,00	1,01	0,60	0,03	0,31	–	–	–	1,69
U	0,43	0,40	1,07	0,39	0,20	0,06	0,11	–	–	–	0,49

Примечание. **1–6** – гранат из метаморфических разновидностей гнейсов чупинской свиты (микрокомпоненты – ICP MS): **1** – реликтовых Grt-Bt I фации (n = 20), **2** – Ky-Grt-Bt II фации (n = 14), **3** – Ky-Grt-Bt III фации (n = 23), **4, 5** – Ms-содержащих IV фации: **4** – гнейса-4/2 (n = 21), **5** – гнейса-4/3 (n = 26); **6** – гранат Ky-Grt-Bt-гнейсов проявления «Западная Плотина» (макрокомпоненты по: [Гранатовые..., 2009, табл. 10], микрокомпоненты – n = 21, LA ICP MS); **7–9** – гранат из жедрититов месторождения «Тербеостров»: **7** – макрокомпоненты – по паспорту № 1211 [Государственный..., 2017], микрокомпоненты – 14 анализов, LA ICP MS; **8, 9** – по: [Скублов и др., 2009, табл. 2]; **8** – ядерная зона граната (среднее по анализам Grt1 и Grt2), **9** – краевая зона (среднее по анализам Grt3 и Grt4); **10** – гранат Ky-гнейсов проявления «Слюдяной Бор» (n = 7) [Слюдоносные..., 1976]; **11** – гранат из Sil-Grt-Bt-гнейсов и сланцев месторождения «Кительское» и его окрестностей (макрокомпоненты – 56 анализов, EMPA; микрокомпоненты – ICP MS, n = 6); n – число проб; прочерк – отсутствие данных; РЗМ = ΣLn₂O₃ + Y₂O₃; ^YРЗМ = Σ^YLn₂O₃ + Y₂O₃; ^YРЗМ, % = 100 × ^YРЗМ/РЗМ.

Прогнозные ресурсы Sc и РЗМ на некоторых карельских гранатовых объектах оценены в первом приближении (табл. 3) с использованием опубликованных сведений о МСБ граната и новых данных о содержании в нем этих полезных компонентов (табл. 1). Для оценки гранатовых объектов кемско-беломорской группы,

локализованных и в сиалических, и в мафических породах, использованы минимальные значения среднего содержания РМ в тербеостровском гранате из жедрититов (табл. 1, столбец 7), хотя в нем может концентрироваться и большее количество РЗМ (табл. 1, столбцы 8 и 9). Такой подход заведомо резко занижает

Таблица 2. Сравнение источников Sc и PЗМ по показателю «ценность тонны руды»

Продукт	Стоимость потенциальных редкометаллических товарных продуктов, содержащихся в тонне руды													
	Цена, US\$/kg	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Sc ₂ O ₃ ≥ 99,95 %	4200	942,45	886,36	1217,64	1203,82	1289,09	884,77	608,32	1141,73	526,93	-	-	-	726,60
Y ₂ O ₃ ≥ 99,99 %	6	1,17	0,85	1,31	1,89	1,86	1,48	1,38	2,31	1,49	2,59	2,34	0,68	-
Ln ₂ O ₃ ≥ 99,5 %	2	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0	0	0,01	0,48	4,86	5,44	3,13	-
Ce ² O ₃ ≥ 99,5 %	2	0,02	0,02	0,06	0,02	0,01	0	0	0,02	1,00	7,74	8,71	3,85	-
Pr ₂ O ₃ ≥ 99,5 %	52	0,06	0,07	0,21	0,06	0,04	0,01	0,02	0,07	0	23,4	28,76	10,22	-
Nd ₂ O ₃ ≥ 99,5 %	42	0,21	0,23	0,69	0,20	0,14	0,02	0,06	0,24	8,13	52,92	60,06	30,28	-
Sm ≥ 99,9 %	7	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,15	1,14	1,15	0,62	-
Eu ₂ O ₃ ≥ 99,99 %	150	0,06	0,04	0,07	0,04	0,04	0,04	0,07	0,05	1,39	9,45	7,50	3,08	-
Gd ₂ O ₃ ≥ 99,5 %	32	0,37	0,35	0,39	0,35	0,36	0,52	0,36	0,26	4,43	4,90	5,76	1,98	-
Tb ₂ O ₃ ≥ 99,5 %	400	1,38	1,26	1,54	1,73	1,79	2,35	1,53	1,58	0	3,60	7,83	20,16	-
Dy ₂ O ₃ ≥ 99,5 %	230	6,86	5,66	7,54	10,05	9,87	9,81	8,14	11,10	0	22,77	16,1	7,13	-
Er ₂ O ₃ ≥ 99,5 %	34	0,74	0,53	0,82	1,19	1,13	0,88	0,82	1,71	0,97	1,22	0,51	0,29	-
Ga	145	-	-	-	-	-	-	-	-	64,09	-	-	-	-
PЗМ		10,90	9,04	12,68	15,55	15,26	15,12	12,39	17,36	18,04	134,59	144,16	81,42	-
сPЗМ		0,30	0,33	0,99	0,29	0,20	0,03	0,08	0,34	9,61	88,92	102,97	47,48	-
УРЗМ		10,60	8,71	11,69	15,26	15,06	15,09	12,31	17,02	8,43	45,67	41,19	33,94	-
Ценность тонны руды		953,34	895,40	1230,33	1219,35	1304,34	899,89	620,70	1159,11	609,07	134,59	144,16	81,42	726,60

Примечание. 1–8 – карельский гранат (содержание РМ – по табл. 1); 1–7 соответствуют номерам в табл. 1; 8 – гранат месторождения «Кителея»; 9 – красный шлам (содержание РМ по: [Кашев и др., 2014]); 10 – хибинский апатит (содержание РМ по: [Самонов, 2008]); 11 – хибинский апатит; 12 – фосголипс (11–12 – содержание РМ по: [Сарычев и др., 2013]); 13 – пироксеновые хвосты обогащения титаномагнетитовых руд качанарского типа (содержание Sc по: [Борисенко и др., 1997]); цена товарных продуктов на 31.12.2015 г. по данным: [MineralPrices.com / URL: http://mineralprices.com/?hc_location=ufi; дата обращения: 11.03.2016 г.].

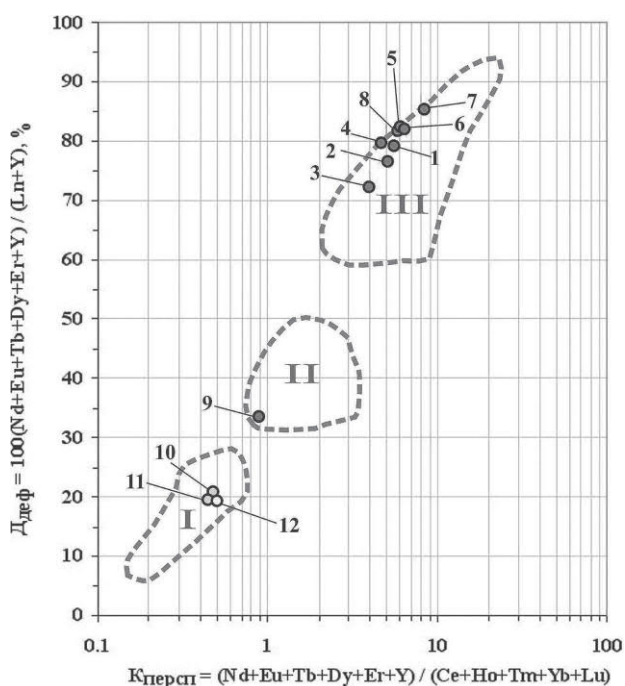


Рис. 2. Сравнение различных источников РЗМ с учетом соотношения в их составе групп дефицитных и избыточных компонентов

Арабскими цифрами пронумерованы фигуративные точки составов РЗЭ: **1–8** – в гранате (содержание по данным из табл. 1, 2); **1** – из гнейса-1; **2** – из гнейса-2; **3** – из гнейса-3; **4** – из гнейса-4₂; **5** – из гнейса-4₃; **6** – из проявления «Западная Плотина»; **7** – из месторождения «Тербеостров»; **8** – из месторождения «Кительское»; **9** – в красном шламе (содержание по: [Кашеев и др., 2014]); **10** – в хибинском апатите (содержание по: [Самонов, 2008], **11** – в хибинском апатите; **12** – в фосфогилсе (11, 12 содержание по: [Сарычев и др., 2013]); римскими цифрами обозначены поля перспективности рудных объектов в зависимости от состава РЗЭ: I – неперспективные, II – перспективные, III – высокоперспективные (по: [Середин, 2010] с изменениями)

ресурсы (в амфиболсодержащих породах содержание Sc и Y в гранате меньше по сравнению с безамфиболовыми [Слюдоносные..., 1976]), но вместе с тем, при ограниченности имеющихся фактических данных, дает «запас прочности» прогноза.

Согласно принятой схеме ранжирования месторождений РМ [Быховский, Потанин, 2009, табл. 1], гранатовые объекты по прогнозным ресурсам Sc (табл. 3) соответствуют мелким месторождениям ($Sc_2O_3 < 1$ тыс. т). При этом прогнозные ресурсы наиболее крупного проявления граната «Удинское» (Sc_2O_3 – 695 т) соразмерны утвержденным ГКЗ запасам Sc_2O_3 Туганского месторождения (755 т) или запасам участка «Буранный» Томторского месторождения (балансовые – 563 т, забалансовые – 99,8 т [Томторское..., 2016]). Оцененный «по минимуму» ресурсный потенциал пространственно сближенных и геологически сходных объектов кемско-беломорской группы (табл. 3)

отвечает рангу среднего по запасам месторождения (1–10 тыс. т Sc_2O_3).

Увеличение сырьевой базы граната, Sc и РЗМ в Карелии возможно при доизучении уже известных объектов, а также при выявлении и оценке новых.

Целесообразны геологоразведочные мероприятия по подготовке и утверждению запасов граната и РМ на проявлениях и месторождениях гранатовых руд. Следует заметить, что потенциал некоторых из них явно недооценен. Так, например, на месторождении «Кительское» разведочные работы выполнены на площади $\approx 0,022$ км², а запасы подсчитаны на глубину 3 м [Государственный..., 2017, паспорт № 1306], хотя здесь продуктивные породы имеют крутое падение и распространены на значительно большей территории.

Пример тербеостровских жедрититов показывает, что гранатовые руды, генетически связанные с породами основного состава, вполне могут представлять интерес как источник РМ. В связи с этим необходимо изучение микрокомпонентного состава граната из его руд в метабазах, в первую очередь из наиболее крупного месторождения «Энгозерское» (запасы категории C₂ – 36200 тыс. т граната при среднем его содержании 60 % [Минерально-сырьевая..., 2006]).

Для проведения поисково-оценочных работ наиболее благоприятно Западное Беломорье, особенно территория обширного северокарельского ареала пород чупинской свиты. В отношении Sc и РЗМ интересен гранат гнейсов всех минеральных фаций (рис. 1; табл. 1, 2), но при поисках гранатовых руд следует учитывать их специфику.

Гнейс-1 (содержание граната 2,0–14,6 при среднем значении 7,8 объемных %) сохранился в относительно небольших по размеру реликтовых блоках среди более поздних образований, преимущественно в гнейсе-2.

Гнейс-2 (содержание граната 4,2–36, в среднем 9,7 объемных %) распространен достаточно широко и на некоторых участках Северокарельского ареала пород чупинской свиты является их доминирующей разновидностью.

Гнейс-3 с относительно выдержанным содержанием граната и Sc в нем (табл. 1) составляет весомую часть пород чупинской толщи, выполняя крупные зоны сдвиговой деформации (протяженность по простиранию достигает десятков километров, а истинная мощность – сотен метров). Площади развития средне-, крупнозернистого линзовидно-полосчатого дифференцированного кианит-гранат-биотитового гнейса-3 представляются наиболее

Таблица 3. Прогнозные ресурсы Sc и PЗМ на месторождениях и проявлениях граната

Месторождения и проявления граната	Запасы и ресурсы граната*, т	Прогнозные ресурсы Sc и TR, т				
		Sc ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Ln ₂ O ₃	TR ₂ O ₃	∑TR ₂ O ₃
Солохина Луда	6000	0,9	1,4	0,7	2,0	2,0
Еловый Наволок	29000	4	7	3	10	10
Тербеостров	562740	82	129	63	192	190
Кожручейское	1008000	146	231	112	344	340
Кислячиха	4600	0,7	1,1	0,5	1,6	1,5
Удинское	4800000	695	1102	534	1636	1617
Кузостровское	800000	116	184	89	273	270
Кемско-беломорская группа в целом	7210340	1044	1655	803	2457	2429
Западная Плотина	500000	105	123	70	193	193
Кительское	7500	2,0	2,9	1,7	4,6	4,4

Примечание. *Источники информации: [Государственный..., 2017, паспорта месторождений № 1209–1211, 1306, паспорта проявлений № 71–73, 125, 52025; Минерально-сырьевая..., 2006, табл. 2.3.2.5].

благоприятными для поисков гранатовых руд. Уже обследованные участки в их пределах характеризуются промышленным содержанием граната и высоким качеством кианита (примеры – проявления «Западная Плотина» и «Запарногубское» со средним содержанием граната 15 и 8,4–9,4 % соответственно [Щипцов и др., 2009]), а также большими объемами пород, комплексных руд индустриальных минералов, для которых уже разработаны относительно простые технологические схемы получения востребованных промышленностью гранатового, кианитового, кварц-полевошпатового, биотитового концентратов [Там же]. Возможность многоцелевого использования этих товарных продуктов будет способствовать снижению затрат на добычу граната – источника РМ.

Гнейсы и сланцы-4_{1,2,3} формировались в зонах сдвиговой деформации меньшего размера (длина по простиранию – километры, мощность – десятки метров). Сильно варьирующее содержание граната (0,6–17,6 объемных %) зависит от количества этого минерала в протолитах мусковитовых диафторитов и интенсивности их преобразования (в характерном для IV тектоно-метаморфического этапа аллохимическом процессе кислотного выщелачивания при высоком потенциале калия и натрия гранат становился неустойчивым). При образовании гнейсов и сланцев IV минеральной фации Sc, концентрировавшийся ранее в гранате протолитов, накапливался в мусковите (среднее содержание Sc₂O₃ – 74,59 г/т, n = 13, ICP MS); PЗМ переходили в состав новообразующихся ксенотима, монацита и иных редкоземельных минералов. При поисках гранатовых объектов интерес могут представлять гнейсы-4₃, отве-

чающие начальным стадиям преобразования гнейса-3 в мусковитовый диафторит.

В будущем возможна попутная добыча гранатового и других минеральных концентратов из всех разновидностей горных пород при освоении благороднометалльно-медно-никелевых рудных объектов крупнообъемного типа, прогнозируемых и уже выявленных, в частности, в области развития гнейсов чупинской свиты. Так, например, на участке «Малиновая Варакка», в границах которого широко развиты гнейсы-3, ресурсы категории P₃ составляют: Pt и Pd – 10,4 т, Au – 7,6 т, Cu – 43 тыс. т, Ni – 33 тыс. т [Шевченко, 2011]. Здесь следует отметить, что в мономинеральных фракциях граната, выделенных из образцов различных разновидностей гнейсов Лоушского, Плотинского, Малиновараккского, Тэдинского пегматитовых полей, содержание Au варьирует от 0,05 до 0,32 г/т при среднем значении 0,13 г/т (n = 64, полуколичественный ICP MS).

Заключение

Вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы.

Широко распространенный на территории Карелии породообразующий минерал метаморфогенный пиральспитовый гранат характеризуется промышленно значимым содержанием Sc и высокоперспективным составом сопутствующих PЗМ (доля ∑PЗМ – 85,5–99,8 %). Гранат сиалических пород по содержанию Sc₂O₃ (211–521 г/т) превосходит признанные крупнообъемные источники этого металла, такие как красные шламы и силикатные хвосты обогащения титаномагнетитовых руд.

Прогнозные ресурсы Sc, оцененные «в первом приближении» и «по минимуму» на некоторых карельских месторождениях и проявлениях граната, соразмерны запасам мелких месторождений этого металла. Суммарные ресурсы пространственно сближенных и геологически сходных объектов кемско-беломорской группы соответствуют рангу среднего по запасам месторождения.

Анализ геологических условий свидетельствует о реальной возможности существенного увеличения рудной базы граната, следовательно, и РМ. В этом аспекте наиболее подходящими для первоочередных поисково-оценочных работ являются гранатсодержащие разновидности сиалических пород беломорского комплекса. Вместе с тем необходимо и целенаправленное изучение гранатовых руд, локализованных в мафических породах.

По сравнению со многими российскими редкометалльными объектами карельские гранатовые проявления и месторождения расположены на территории с более благоприятными географо-экономическими условиями, в районах, где успешно работали и ныне действуют предприятия горнодобывающей промышленности.

Таким образом, имеются объективные предпосылки, позволяющие оптимистически оценивать карельский гранат как новый перспективный комплексный источник Sc и сопутствующих РЗМ. Для надлежущего обоснования возможности использования граната в качестве руды этих металлов целесообразно продолжение всестороннего геологического изучения карельских гранатовых объектов и технологических исследований (решение проблемы извлечения Sc и РЗМ из граната в промышленных масштабах). Актуальность этих мероприятий определяется необходимостью развития отечественной сырьевой базы дефицитных редких металлов и стратегией импортозамещения.

Автор благодарит Т. П. Бубнову за предоставление образцов гранатсодержащих пород проявления «Западная Плотина», В. В. Щипцова и Г. Б. Мелентьева за рецензирование статьи.

Литература

Бавлов В. Н., Комин М. Ф., Усова Т. Ю. Программа изучения и воспроизводства минерально-сырьевой базы редких металлов России // Разведка и охрана недр. 2006. № 9-10. С. 6-13.

Борисенко Л. Ф., Еремин Н. Я., Усков Е. Д. Роль скандия в повышении комплексного использования титаномагнетитовых руд // Горная промышленность. 1997. № 1. С. 15-20.

Бортников Н. С., Волков А. В., Галямов А. Л., Викентьев И. В., Аристов В. В., Лаломов А. В., Мурашов К. Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 2. С. 97-119.

Быховский Л. З. Реальные, потенциальные и перспективные источники редкоземельного сырья в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2014. № 4. С. 2-8.

Быховский Л. З., Архангельская В. В., Тигунов Л. П., Ануфриева С. И. Перспективы освоения минерально-сырьевой базы и развития производства скандия в России и других странах СНГ // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2007. № 5. С. 27-32.

Быховский Л. З., Потанин С. Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений // Минеральное сырье. Сер. геол.-экономическая. М.: РИС ВИМС, 2009. № 28. 157 с.

Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов в Российской Федерации в 2014. М., 2015. 313 с.

Государственный кадастр месторождений. Неметаллы // Управление недропользования Министрства по природопользованию и экологии Республики Карелия [Электронный ресурс]. URL: <http://nedrark.karelia.ru> (дата обращения: 07.02.2017 г.)

Иващенко В. И. Главные рудно-формационные типы редкометалльного оруденения Карелии // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 2. С. 189-194.

Качан И. Н. Об испытаниях обогатимости дистенно-гранатовой породы Шуерецкого месторождения // Материалы по полевым шпатам и гранатам Карелии. Петрозаводск, 1935. С. 101-139.

Кашцев И. Д., Земляной К. Г., Доронин А. В., Козловских Е. Ю. Новые возможности кислотного способа получения оксида алюминия // Новые огнеупоры. 2014. № 4. С. 6-12.

Кременецкий А. А., Архипова Н. А., Усова Т. Ю. Редкие металлы для высоких технологий: проблемы и пути решения // Разведка и охрана недр. 2011. № 5. С. 37-43.

Кременецкий А. А., Архипова Н. А. Состояние и перспективы освоения МСБ редких металлов // Разведка и охрана недр. 2013. № 4. С. 35-44.

Кременецкий А. А., Калиш Е. А. Комплексные редкометалльные месторождения России и основные направления повышения их инвестиционной привлекательности // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 3-11.

Мелентьев Г. Б. Концепция восстановления и развития производств редких металлов в России // Инновационная экономика. 2011. № 4. С. 104-113.

Мелентьев Г. Б. Редкоземельный ресурс инновационного развития российских производств: состояние и перспективы // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2013. № 3 (119). С. 82-94.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений

и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Ниобиевые, танталовые руды и редкоземельные элементы. М., 2007. 42 с.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Книга II. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.

Михайлов В. А. Редкоземельные руды мира: геология, ресурсы, экономика. Киев: Киевский ун-т, 2010. 223 с.

Михайлов Ю. М. Редкоземельные металлы как основа получения перспективных материалов, необходимых для развития вооружения и военной техники // Федеральный справочник: Оборонно-промышленный комплекс. М.: Центр стратег. программ, 2014. Т. 10. С. 129–134.

Наумов А. В. Обзор мирового рынка редкоземельных металлов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2008. № 1. С. 22–31.

Пономарев А. И. Методы химического анализа силикатных и карбонатных горных пород. М.: АН СССР, 1961. 414 с.

Ручьев А. М. Карельский гранат – перспективный источник редких металлов // Роль науки в решении проблем региона и страны: фундаментальные и прикладные исследования: Матер. Всерос. науч. конф. с межд. участием, посвящ. 70-летию КарНЦ РАН (г. Петрозаводск, 24–27 мая 2016 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. С. 290–293.

Ручьев А. М. Карельский гранат – перспективный источник скандия и редкоземельных металлов иттриевой группы // Новые идеи в науках о Земле: Материалы XIII Межд. науч.-практ. конф. (Москва, 5–7 апреля 2017 г.). М.: МГРИ-РГГРУ, 2017. С. 241–242.

Самонов А. Е. Перспективы развития производства и потребления редкоземельной продукции в России // Типоморфные минералы и минеральные ассоциации – индикаторы масштабности природных и техногенных месторождений и качества руд: Матер. Всерос. науч. конф. Годичное собрание РМО. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2008. С. 134–138.

Сарычев Г. А., Косынкин В. Д., Трубаков Ю. М. Современное состояние исследований в области технологии редкоземельных элементов в России // Актуальные вопросы добычи, производства

и применения редкоземельных элементов в России: Матер. Всерос. конф. по редкоземельным материалам «РЗМ-2013», 20–21 ноября 2013 г. Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. С. 12–20.

Светов С. А., Степанова А. В., Чаженина С. Ю., Светова Е. Н., Рыбникова З. П., Михайлова А. И., Парамонов А. С., Утицына В. Л., Эхова М. В., Колодей В. С. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Середин В. В. Новый метод первичной оценки перспективности редкоземельных руд // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52, № 5. С. 475–480.

Середин В. В., Кременецкий А. А., Трач Г. Н., Коваленко С. В., Семенов Е. Ф. Новый потенциально промышленный тип иттриевоземельной минерализации в Юго-Западном Приморье // Разведка и охрана недр. 2006. № 9-10. С. 37–42.

Слюдоносные пегматиты Северной Карелии (геология, минералогия, геохимия и генезис) / Под ред. В. В. Гордиенко, В. А. Леоновой. Л.: Недра, 1976. 367 с.

Скублов С. Г., Левский Л. К., Марин Ю. Б., Гембицкая И. М., Азимов П. Я., Ларионов А. Н. Возраст, геохимия минералов и условия образования Шуерецкого месторождения гранатов (Беломорский пояс) // ДАН. 2009. Т. 429, № 5. С. 661–667.

Томторское месторождение // Региональный портал Дальний Восток [Электронный ресурс]. URL: <http://nedradv.ru/mineral/places/?search=%D1%82%D0%BE%D0%BC%D1%82%D0%BE%D1%80> / (дата обращения: 23.11.2016).

Шевченко С. С. Минералого-геохимические особенности рудоносных метасоматитов и перспективы выявления комплексного благороднометалло-медно-никелевого оруденения в Беломорском подвижном поясе: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2011. 20 с.

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Скамницкая Л. С., Гаранжа А. В., Ручьев А. М. Гранатовые руды Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 208 с.

Поступила в редакцию 07.04.2017

References

Bavlov V. N., Komin M. F., Usova T. Yu. Programma izucheniya i vosproizvodstva mineral'no-syr'evoi bazy redkikh metallov Rossii [The program for studying and reproducing the mineral resources base of rare metals in Russia]. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and Protection of Mineral Resources]. 2006. No. 9-10. P. 6–13.

Borisenko L. F., Eremin N. Ya., Uskov E. D. Rol' skandiya v povyshenii kompleksnogo ispol'zovaniya titanomagnetitovykh rud [The role of scandium in the increase of complex use of titanomagnetite ores]. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry]. 1997. No. 1. P. 15–20.

Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikent'ev I. V., Aristov V. V., Lalomov A. V., Mura-shov K. Yu. Mineral'nye resursy vysokotekhnologichnykh metallov v Rossii: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Mineral resources of high-tech metals in Russia: state of the art outlook]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits]. 2016. Vol. 58, no. 2. P. 97–119.

Bykhovskii L. Z. Real'nye, potentsial'nye i perspektivnye istochniki redkozemel'nogo syr'ya v Rossii [Existing, potential, and promising sources of rare-earth minerals in Russia]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika*

i upravlenie [Mineral Resources of Russia. Economics & Management]. 2014. No. 4. P. 2–8.

Bykhovskii L. Z., Arkhangel'skaya V. V., Tiginov L. P., Anufrieva S. I. Perspektivy osvoeniya mineral'no-syr'evoi bazy i razvitiya proizvodstva skandiya v Rossii i drugikh stranakh SNG [Development potentialities of the scandium resource base and production in Russia and other CIS countries]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics & Management]. 2007. No. 5. P. 27–32.

Bykhovskii L. Z., Potanin S. D. Geologo-promyshlennyye tipy redkometal'nykh mestorozhdenii [Geology-industrial types of rare-metal deposits]. *Mineral'noe syr'e. Seriya geologo-ekonomicheskaya* [Mineral Raw Materials. Geol. and Economical Ser.]. Moscow: VIMS Publishing house, 2009. No. 28. 157 p.

Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov v Rossiiskoi Federatsii v 2014 [The state report on the state and use of mineral resources in the Russian Federation in 2014]. Moscow, 2015. 313 p.

Gosudarstvennyi kadastr mestorozhdenii. Nemetally [State inventory of deposits. Nonmetals]. Upravlenie nedropol'zovaniya Ministerstva po prirodopol'zovaniyu i ekologii Respubliki Kareliya [The Subsurface Resources Management Department of the Ministry of Nature Management and Ecology of the Republic of Karelia]. URL: <http://nedrark.karelia.ru> (accessed: 07.02.2017).

Ivashchenko V. I. Glavnye rudno-formatsionnye tipy redkometal'nogo orudneniya Karelii [Main types of rare-metal mineralization in Karelia]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits]. 2016. Vol. 58, no. 2. P. 189–194.

Kachan I. N. Ob ispytaniyakh obogatimosti distenogranatovoi porody Shueretskogo mestorozhdeniya [On the tests of the kyanite-garnet rock enrichment of the Shueretskoe deposit]. *Materialy po polevym shpatam i granatam Karelii* [Materials on Feldspar and Garnets of Karelia]. Petrozavodsk, 1935. P. 101–139.

Kashcheev I. D., Zemlyanoi K. G., Doronin A. V., Kozlovskikh E. Yu. Novye vozmozhnosti kislotnogo spsobolucheniya oksida alyuminiya [New possibilities of the acid method for aluminum oxide production]. *Novye ognepury* [New Refractories]. 2014. No. 4. P. 6–12.

Kremenetskii A. A., Arkhipova N. A., Usova T. Yu. Redkie metally dlya vysokikh tekhnologii: problemy i puti resheniya [Rare metals for high technologies: problems and solutions]. *Razvedka i okhrana neutr* [Exploration and Protection of Mineral Resources]. 2011. No. 5. P. 37–43.

Kremenetskii A. A., Arkhipova N. A. Sostoyanie i perspektivy osvoeniya MSB redkikh metallov [State and development prospects of rare metals mineral resources]. *Razvedka i okhrana neutr* [Exploration and Protection of Mineral Resources]. 2013. No. 4. P. 35–44.

Kremenetskii A. A., Kalish E. A. Kompleksnyye redkometal'nye mestorozhdeniya Rossii i osnovnye napravleniya povysheniya ikh investitsionnoi privlekatel'nosti [Complex rare metal deposits of Russia and major lines of increasing their investment attractiveness]. *Razvedka i okhrana neutr* [Exploration and Protection of Mineral Resources]. 2014. No. 9. P. 3–11.

Melent'ev G. B. Kontsepsiya vosstanovleniya i razvitiya proizvodstv redkikh metallov v Rossii [The

conception of the restoration and development of rare metals in Russia]. *Innovatsionnaya ekonomika* [Innovative Economics]. 2011. No. 4. P. 104–113.

Melent'ev G. B. Redkozemel'nyi resurs innovatsionnogo razvitiya rossiiskikh proizvodstv: sostoyanie i perspektivy [Rare-earth resources of innovative development of the Russian industry: conditions and prospects]. *Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii* [Defense Complex for Scientific and Technical Progress in Russia]. 2013. No. 3 (119). P. 82–94.

Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdenii i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Niobieve, tantalovye rudy i redkozemel'nye elementy [Methodical recommendations on the application of the Classification of deposits reserves and possible resources of solid minerals. Niobium, tantalum ores, and rare-earth elements]. Moscow, 2007. 42 p.

Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya. Kniga II. Nemetallicheskie poleznye iskopaemye. Podzemnyye vody i lechebnye gryazi [Mineral resources of the Republic of Karelia. Book II. Nonmetallic minerals. Underground waters and therapeutic muds]. Petrozavodsk: Kareliya, 2006. 356 p.

Mikhailov V. A. Redkozemel'nye rudy mira: geologiya, resursy, ekonomika [Rare-earth ores of the world: geology, resources, economy]. Kiev: Kievskii un-t, 2010. 223 p.

Mikhailov Yu. M. Redkozemel'nye metally – osnova polucheniya perspektivnykh materialov, neobkhodimykh dlya razvitiya vooruzheniya i voennoi tekhniki [Rare earth metals as the basis for obtaining promising materials necessary for the development of weapons and military equipment]. *Oboronno-promyshlennyy kompleks Rossii* [The Defense Industrial Complex of Russia]. Moscow: Center for Strategic Programs, 2014. Vol. 10. P. 129–134.

Naumov A. V. Obzor mirovogo rynka redkozemel'nykh metallov [Review of the world market of rare-earth metals]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Univ. Proceed. Nonferrous Metallurgy]. 2008. No. 1. P. 22–31.

Ponomarev A. I. Metody himicheskogo analiza silikatnykh i karbonatnykh gornykh porod [Methods of chemical analysis of silicate and carbonate rocks]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961. 414 p.

Ruchyov A. M. Karel'skii granat – perspektivnyi istochnik redkikh metallov [The Karelian garnet – a promising source of rare metals]. *Rol' nauki v reshenii problem regiona i strany: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: Mater. Vseros. nauchn. konf. s mezhd. uchastiem, posv. 70-letiyu KarNTs RAN (Petrozavodsk, 24–27 maya 2016 g.)* [The Role of Science in the Solution of Problems of the Region and Country: Basic and Applied Research. Proceed. of the All-Russ. Scientific Conf. with Int. Part. Dedicated to the 70th Anniv. of the KarRC of the RAS (Petrozavodsk, May 24–27, 2016)]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2016. P. 290–293.

Ruchyov A. M. Karel'skii granat – perspektivnyi istochnik skandiya i redkozemel'nykh metallov ittrievoi gruppy [The Karelian garnet – a promising source of scandium and rare-earth yttrium-group metals]. *Novye idei v naukach o Zemle. Materialy XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 5–7 aprelya 2017 g.)* [New Ideas in Earth Sciences: Proceed. of XIII Int. Scientific

and Practical Conf. (Moscow, April 5–7, 2017)]. Moscow: MGRI-RGGRU, 2017. P. 241–242.

Samonov A. E. Perspektivy razvitiya proizvodstva i potrebleniya redkozemel'noi produktsii v Rossii [The prospects of production and consumption of rare-earth products in Russia]. *Tipomorfnye mineraly i mineral'nye assotsiatsii – indikatory masshtabnosti prirodnykh i tekhnogennykh mestorozhdenii i kachestva rud: Mater. Vseros. nauchn. konf. Godichnoe sobranie RMO* [Typomorphic Minerals and Mineral Associations – Indicators of the Scale of Natural and Technogenic Deposits and Ores Quality. Proceed. of the All-Russ. Scientific Conf. Annual Meeting of the RMS]. Ekaterinburg: IGG UrB RAS, 2008. P. 134–138.

Sarychev G. A., Kosynkin V. D., Trubakov Yu. M. Sovremennoe sostoyanie issledovaniy v oblasti tekhnologii redkozemel'nykh elementov v Rossii [The current state of research in the field of rare-earth element technology in Russia]. *Aktual'nye voprosy dobychi, proizvodstva i primeneniya redkozemel'nykh elementov v Rossii: mater. Vseros. konf. po redkozemel'nym materialam RZM-2013, 20–21 noyabrya 2013 g.* [Topical Issues of Extraction, Production and Application of Rare-earth Elements in Russia: Proceed. of the All-Russ. Conf. on Rare-earth Materials REM-2013 (November 20–21, 2013)]. Seversk: STI NIYaU MIFI, 2013. P. 12–20.

Seredin V. V. Novyi metod pervichnoi otsenki perspektivnosti redkozemel'nykh rud [A new method for primary evaluation of the potential of rare earth element ores]. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits]. 2010. Vol. 52, no. 5. P. 475–480.

Seredin V. V., Kremenetskii A. A., Trach G. N., Kovalenko S. V., Semenov E. F. Novyi potentsial'no promyshlennyi tip ittrievozemel'noi mineralizatsii v Yugo-Zapadnom Primor'e [A new potentially industrial type of yttrium earth mineralization in the south-western Primorye]. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and Protection of Mineral Resources]. 2006. No. 9-10. P. 37–42.

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Skamnitskaya L. S., Garanzha A. V., Ruchyov A. M. Granatovye rudy Karelii [Garnet ores of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2009. 208 p.

Shevchenko S. S. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rudonosnykh metasomatitov i perspektivy vyavleniya kompleksnogo blagorodnometall'no-medno-nikelevogo orudneniya v Belomorskom podvizhnom poyase deposit [Mineralogical and geochemical features of ore-bearing metasomatites and prospects for the detection of complex noble metal-copper-nickel mineralization in the Belomorian mobile belt]: Summary of PhD (Cand. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg, 2011. 20 p.

Slyudonosnye pegmatity Severnoi Karelii (geologiya, mineralogiya, geokhimiya i genezis) [Micaceous pegmatites of Northern Karelia (geology, mineralogy, geochemistry, and genesis)]. Leningrad: Nedra, 1976. 367 p.

Skublov S. G., Levskii L. K., Marin Yu. B., Gembitskaya I. M., Azimov P. Ya., Larionov A. N. Vozrast, geokhimiya mineralov i usloviya obrazovaniya Shueretskogo mestorozhdeniya granatov (Belomorskii poyas) [Age, mineral geochemistry, and conditions of the formation of the Shueretskoe garnet deposit (Belomorian Belt)]. *DAN [Dokl. Earth Sciences]*. 2009. Vol. 429, no. 5. P. 661–667.

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Mikhailova A. I., Rybnikova Z. P., Paramonov A. S., Utitsina V. L., Kolodei V. S., Ekhova M. V. Pretsizionnyi (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornyykh porod i mineralov: metodika i otsenka tochnosti rezul'tatov na primere rannedokembriiskikh mafitovykh kompleksov [Precise geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of rock and mineral composition: the method and accuracy estimation in the case study of the Early Precambrian mafic complexes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. of KarRC of RAS]. 2015. No. 7. P. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Tomtorskoe mestorozhdenie. Regional'nyi portal Dal'nii Vostok [The Tomtorsk mineral deposit. The Far Eastern regional portal]. URL: <http://nedradv.ru/mineral/places/?search=%D1%82%D0%BE%D0%BC%D1%82%D0%BE%D1%80/> (accessed: 23.11.2016).

Received April 07, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Ручьев Андрей Михайлович

старший научный сотрудник
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: ruchyov@krc.karelia.ru
тел.: 89214559451

CONTRIBUTOR:

Ruchyov, Andrey

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ruchyov@krc.karelia.ru
tel.: +79214559451