

УДК 553.493:622(470.22)

РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ГРАНАТОВЫХ РУД КАРЕЛИИ



А. М. РУЧЬЕВ,
старший научный сотрудник, ruchyov@krc.karelia.ru

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

Введение

Скандий, иттрий, лантан и лантаноиды, применяемые в современных технологиях различных отраслей промышленности, во многих странах получили статус «критических». Возрастающий спрос на эти металлы предопределяет необходимость решения разнообразных проблем, связанных в первую очередь с особенностями сырьевой базы и возможностями ее развития [1–4].

Скандий и редкоземельные металлы (TR) иттриевой группы ($YTR = Y + Sm + Eu + \dots + Lu$ [5]) в 1996 г. были включены в перечень минерального стратегического сырья, на развитие рудной базы дефицитных видов которого предписывалось первоочередное направление средств [6]. В опубликованном двадцать лет спустя российском списке «критических» металлов скандий и YTR занимают высокорейтинговые места [7], т. е. в настоящее время являются проблемными. В ряду причин «критичности» скандия и YTR объективными являются неоднократно обсуждавшиеся [8] негативные особенности их минерально-сырьевой базы (МСБ). Действенное мероприятие по ее улучшению – поиск новых источников этих редких металлов (PM), в частности «нетрадиционных». Выявление последних важно, так как прогнозируется [9], что будущий спрос на некоторые TR уже не удастся удовлетворить увеличением добычи руд «сегодняшнего» минерального состава.

В качестве нового перспективного источника скандия и YTR предложен [10, 11] метаморфогенный породообразующий минерал – пиральспитовый гранат.

Карельский гранат с 1930-х годов привлекал внимание как природный материал, пригодный для изготовления абразивов и использования в иных целях. В ходе создания его МСБ многочисленные гранатоворудные объекты были выявлены на территории в границах Лоухского (месторождение Нигрозеро; проявления Левин Бор, Западная Плотина, Варацкое, Слюдозерское (Запарногубское), Участок Гранатовый (Энгозерское), Высота-181 (Шариваара), Униярви и др.), Кемского (месторождения: Тербеостров, Еловый Наволок, Солохина Луда; проявления: Кислячиха, Кожручейское, Беломорского (проявления Кузостровское, Удинское, Слюдяноборское), Питкярантского (месторождение Кительское) муниципальных районов. На изученных с различной детальностью проявлениях и месторождениях запасы и прогнозные

В результате изучения микроэлементного состава пиральспитового граната установлено, что его можно рассматривать в качестве перспективного источника скандия и редкоземельных металлов иттриевой группы.

Определены прогнозные ресурсы этих металлов на некоторых карельских месторождениях и проявлениях гранатовых руд.

Ключевые слова: гранат, рудопроявления и месторождения, редкие металлы, редкоземельные металлы, скандий, иттрий, прогнозные ресурсы.

DOI: 10.17580/gzh.2019.03.10

ресурсы граната составляют не менее 49,2 млн т [12–14]. Более восьмидесяти лет они остаются невостребованными.

Наличие сведений о значительной сырьевой базе и особенностях микрокомпонентного состава граната способствовало изучению его в качестве возможного источника скандия и YTR. Первые результаты исследований изложены далее.

Методика и результаты исследований

Одной из задач проведенных работ было получение новых сведений о содержании скандия и TR в гранате. Пробоподготовка и определение химического состава выполнены в Аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН. Мономинеральные фракции граната выделены из 112 образцов горных пород массой 0,3–60 кг с применением электромагнитной и магнитной сепарации, ультразвуковой обработки, тяжелых жидкостей. Содержание микрокомпонентов определено с использованием квадрупольного масс-спектрометра X-SERIES 2 (Thermo Fisher Scientific) с приставкой UP-266 MACRO (New Wave Research): в минеральных индивидах – методом LA-ICP MS, в мономинеральных концентратах – методом ICP MS (контроль по стандартным образцам СГД-1 и ВНВО-2; погрешность определения TR – 4,5–10 %, Sc – не более 13 %).

Большинство выявленных проявлений и месторождений гранатовых руд локализовано в метаморфических образованиях беломорского комплекса. Результаты предшествующих работ [15], позволили сосредоточить внимание на сиалических горных породах, в которых гранат – главный концентрат PM.

Самым представительным примером таких пород в Западном Беломорье служат гранатосодержащие парагнейсы чупинской свиты. Последовательное формирование их метаморфических разновидностей происходило в изменявшихся условиях полиэтапного архей-протерозойского эндогенеза, которые определяли химический состав граната и его содержание в гнейсах. Гранат чупинских гнейсов из их наиболее обширного северокарельского ареала характеризуется по образцам, отобранным на площадях Лоухского, Плотинского, Малиноваракского,

Тединского пегматитовых полей. Здесь в гранате главных минеральных фаций гнейсов [11] среднее содержание оксидов РМ (г/т) варьирует в диапазонах: Sc_2O_3 – 211–307; Y_2O_3 – 142–309; TR_2O_3 – 245–485; YTR_2O_3 – 224–467. Гранату сиалических пород кемско-беломорской площади (образцы из окрестностей проявления Удинское) свойственны следующие средние содержания, г/т: Sc_2O_3 – 227; Y_2O_3 – 213; TR_2O_3 – 319; YTR_2O_3 – 299.

Гранат из его руд в апобазитовых разновидностях беломорид характеризуется образцами с месторождения Тербеостров (среднее содержание, г/т: Sc_2O_3 – 145; Y_2O_3 – 229; TR_2O_3 – 341; YTR_2O_3 – 337) и проявления Участок Гранатовый (среднее содержание, г/т: Sc_2O_3 – 147; Y_2O_3 – 119; TR_2O_3 – 188; YTR_2O_3 – 177).

В Северном Приладожье с использованием образцов руд месторождения Китильское и пород его обрамления определен микрокомпонентный состав граната (среднее содержание, г/т: Sc_2O_3 – 272; Y_2O_3 – 385; TR_2O_3 – 608; YTR_2O_3 – 585) силлиманит-гранат-биотитовых сланцев палкъярвинской свиты ладожской серии нижнего протерозоя.

Фактические материалы, полученные в результате исследований, свидетельствуют о высоком содержании Sc и Y в метаморфогенном пиральспитовом гранате, характеризуют весь спектр лантаноидов, дают возможность судить о соотношении групп TR.

Новые сведения о микроэлементном составе граната позволяют определить главные и сопутствующие полезные компоненты, используя для этого принятые значения минимального промышленного содержания в рудах: Sc_2O_3 – 0,01 % [16], TR_2O_3 – 0,2 % [17]. В гранате содержание Sc_2O_3 значительно превышает минимальное промышленное, а суммарное количество TR_2O_3 – меньше 0,2 %, следовательно, Sc является главным полезным компонентом, TR – сопутствующими.

По содержанию U и Th [11] гранат низко-, слаборадиоактивен, его концентратам свойственны близкие к фоновым значения удельной эффективной активности естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) – 13–19 Бк/кг [13].

Сравнение граната с другими крупнообъемными источниками скандия и TR, сходными с ним по примесной природе РМ, такими как красные шламы (Sc – 81,8 г/т, TR – 1177 г/т, YTR – 377 г/т, Ga – 145 г/т [18]) и силикатные хвосты обогащения титаномагнетитовых руд качканарского типа (Sc – 100–130 г/т, среднее содержание – 115 г/т [19]), приводит к следующим результатам.

По показателю «ценность тонны руды» (суммарная стоимость потенциальных товарных продуктов, которые из нее могут быть получены) гранат сиалических пород благодаря высокому содержанию дорогостоящего скандия превосходит другие его источники [11]. Гранат из мафических пород месторождения Тербеостров и проявления Участок Гранатовый уступает пироксенам из руд качканарского типа, но имеет большую «ценность», чем красные шламы.

По критериям первичной оценки редкоземельных руд, основанным на соотношении в них групп дефицитных (Nd, Tb, Dy, Y), потенциально дефицитных (Eu, Er) и избыточных (Ce, Ho, Tm, Yb, Lu) компонентов, которые выделены с учетом прогноза производства и потребления индивидуальных TR [20], гранат, как это было показано [11], относится к высокоперспективным рудам.

Таким образом, по содержанию РМ гранат вполне может конкурировать с крупнообъемными источниками, обеспечивающими весомую часть российских ресурсов скандия.

Прогнозные ресурсы скандия и TR на некоторых месторождениях и проявлениях гранатовых руд могут быть приблизительно оценены с использованием опубликованных сведений о МСБ граната и новых данных о содержании в нем этих металлов.

Ранее [11] для оценки гранатово-рудных объектов кемско-беломорской группы, локализованных и в сиалических, и в мафических породах, были применены минимальные значения среднего содержания РМ в гранате из тербеостровских жедрититов. Такой подход при ограниченности имевшихся фактических данных давал «запас прочности» прогноза, но заведомо занижал ресурсы.

В результатах нового расчета ресурсов скандия и TR (см. таблицу) учтено доминирование сиалических кианитсодержащих продуктивных пород на проявлениях Удинское, Кислячиха и Кузостровское. Применительно к ним использовано среднее значение содержания РМ в гранате кианитовых гнейсов района проявления Удинское, хотя на некоторых участках возможно и более высокое их среднее содержание, как, например, в гранате проявления Слюдяной Бор (Sc_2O_3 – 521,49 г/т, Y_2O_3 – 495,26 г/т, Yb_2O_3 – 68,32 г/т [15]), территориально наиболее близкого к Удинскому.

Большинство гранатово-рудных объектов по прогнозным ресурсам скандия, согласно принятой схеме ранжирования [21], соответствует мелким месторождениям ($Sc_2O_3 < 1$ тыс. т). Ресурсы проявлений Удинское и Участок Гранатовый отвечают рангу среднего месторождения (1–10 тыс. т Sc_2O_3) и существенно превышают утвержденные ГКЗ запасы Sc_2O_3 Туганского месторождения (755 т), а также запасы участка Буранный Томторского месторождения (балансовые – 563 т, забалансовые – 99,8 т [22]).

Увеличение сырьевой базы скандия и YTR в Карелии возможно при доизучении уже известных, а также при выявлении и оценке новых гранатово-рудных объектов. Разумеется, необходимы геологоразведочные мероприятия по подготовке и утверждению запасов РМ.

Прогнозные ресурсы Sc и TR на месторождениях и проявлениях граната, т

Месторождения и проявления гранатовых руд	Гранат [12, 14]		Прогнозные ресурсы Sc и TR				
	Запасы	Ресурсы	Sc_2O_3	Y_2O_3	Ln_2O_3	TR_2O_3	YTR_2O_3
Солохина Луда	6000	–	0,9	1,4	0,7	2,1	2,0
Еловый Наволок	29000	–	4	7	3	10	10
Тербеостров	562740	–	82	129	63	192	190
Кожручейское	–	1008000	146	231	112	343	340
Кислячиха	4600	–	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0
Удинское	4800000	–	1088	1024	507	1531	1433
Кузостровское	–	800000	181	171	84	255	239
Западная Плотина	–	500000	105	123	70	193	193
Участок Гранатовый	36200000	–	5338	4297	2498	6795	6409
Китильское	7500	–	2,0	2,9	1,7	4,6	4,4

Для проведения поисково-оценочных работ наиболее благоприятно Западное Беломорье и, особенно, территория обширного северокарельского ареала парагнейсов чупинской свиты [11]. Обследованные участки в его пределах характеризуются промышленным содержанием граната (15 и 8,4–9,4 % на проявлениях Западная Плотина и Запарногубское соответственно [13]) и скандия в нем. Следует отметить, что гранатосодержащие гнейсы являются комплексными рудами ряда индустриальных минералов. Разработаны относительно простые технологические схемы извлечения из них качественных концентратов: гранатового, кианитового, кварц-полевошпатового, биотитового. Попутное получение нескольких товарных продуктов будет способствовать снижению затрат на добычу граната – источника РМ.

Гранат некоторых разновидностей апобазитов, судя по новым данным, тоже может быть интересен в отношении скандия и ${}^Y\text{TR}$. Следовательно, необходимо целенаправленное изучение гранатовых руд в мафических породах.

Редкометалльный потенциал многочисленных гранатоворудных объектов, выявленных в западной части Арктической зоны Российской Федерации, на территории Республики Карелия и Мурманской области, реальная возможность его увеличения, а также наличие иных источников скандия, в частности ковдорского бадделеита (среднее содержание Sc_2O_3 – 0,08 % (мас.)), прогнозные ресурсы Sc_2O_3 – 420 т [23]), являются серьезными предпосылками для постановки вопроса об организации здесь скандиевой промышленности.

Выводы

Особенности микрокомпонентного химического состава позволяют рассматривать метаморфогенный пиральспитовый гранат как перспективный мономинеральный нерадиоактивный комплексный источник стратегических «критических» металлов с промышленным содержанием скандия (Sc_2O_3 – 145–521 г/т), главного полезного компонента, и высокой долей иттриевой группы в составе сопутствующих редкоземельных элементов (TR_2O_3 – 187–608 г/т, из них ${}^Y\text{TR}_2\text{O}_3$ – 85,5–99,8 %).

Прогнозные ресурсы скандия на оцененных проявлениях и месторождениях граната соразмерны запасам мелких и средних (проявление Удинское: Sc_2O_3 – 1088 т, сопутствующие TR_2O_3 – 1531 т, из них ${}^Y\text{TR}_2\text{O}_3$ – 1443 т; проявление Участок Гранатовый: Sc_2O_3 – 5338 т, TR_2O_3 – 6795 т, из них ${}^Y\text{TR}_2\text{O}_3$ – 6409 т) месторождений этого металла.


Геологические и географо-экономические условия Карелии благоприятны для создания здесь МСБ скандия и ${}^Y\text{TR}$, но при этом актуальной проблемой остается разработка приемлемой промышленной технологии извлечения РМ из граната.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 552 от 01.07.2013 г. [24], для сбережения источников металлов стратегического значения до времени, когда они будут востребованы, целесообразно включение участков недр, содержащих перспективные в отношении скандия и ${}^Y\text{TR}$ гранатоворудные объекты, в Федеральный фонд резервных участков недр.

Библиографический список

- Weng Z., Jowitt S. M., Mudd G. M., Haque N. A. A Detailed Assessment of Global Rare Earth Element Resources: Opportunities and Challenges // *Economic Geology*. 2015. Vol. 110. Iss. 8. P. 1925–1952.
- Goodenough K. M., Schilling J., Jonsson E., Kalvig P., Charles N. et al. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting // *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 72. P. 838–856.
- Baolu Zhou, Zhongxue Li, Congcong Chen. Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies // *Minerals*. 2017. Vol. 7. Iss. 11. DOI: 10.3390/min7110203
- Paulick H., Machacek E. The global rare earth element exploration boom: An analysis of resources outside of China and discussion of development perspectives // *Resources Policy*. 2017. Vol. 52. P. 134–153.
- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых (ниобиевых, танталовых руд и редкоземельных элементов). – М.: ФГУ ГКЗ, 2007. – 42 с.
- О перечне основных видов стратегического минерального сырья: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 16.01.1996 № 50-р. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9015641> (дата обращения: 19.09.2018).
- Бортников Н. С., Волков А. В., Галамов А. Л., Викентьев И. В., Аристов В. В. и др. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // *Геология рудных месторождений*. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.
- 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.
- Наумов А. В. Обзор мирового рынка редкоземельных металлов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2008. № 1. С. 22–31.
- 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 междунар. участием, посвященной 70-летию КарНЦ РАН. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. С. 302–305.
- Ручьев А. М. Карельский гранат – перспективный источник скандия и редкоземельных металлов // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Сер. Геология докембрия*. 2017. № 11. С. 30–42.
- Государственный кадастр месторождений. Неметаллы / Министерство по природопользованию и экологии Республики Карелия, 2014. URL: http://nedrark.karelia.ru/pasport_gkm/pasportb/gkm_main_b.php (дата обращения: 07.02.2017).
- Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Скамницкая Л. С., Гаранжа А. В., Ручьев А. М. Гранатовые руды Карелии. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. – 208 с.
- Минерально-сырьевая база Республики Карелия / под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. – Петрозаводск: Карелия, 2006. Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. – 356 с.
- Слюдоносные пегматиты Северной Карелии (геология, минералогия, геохимия и генезис) / под ред. В. В. Гордиенко, В. А. Леоновой. – Л.: Недра, 1976. – 367 с.
- Михайлов В. А. Редкоземельные руды мира: геология, ресурсы, экономика. – Киев: ИПЦ «Киевский университет», 2010. – 223 с.
- Кременецкий А. А., Архипова Н. А. Состояние и перспективы освоения МСБ редких металлов // *Разведка и охрана недр*. 2013. № 4. С. 35–44.
- 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.
- Борисенко Л. Ф., Еремин Н. Я., Усков Е. Д. Роль скандия в повышении комплексного использования титаномагнетитовых руд // *Горная промышленность*. 1997. № 1. С. 51–55.
- Середин В. В. Новый метод первичной оценки перспективности редкоземельных руд // *Геология рудных месторождений*. 2010. Т. 52. № 5. С. 475–480.
- Быховский Л. З., Потанин С. Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений / *Минеральное сырье*. Сер. геолого-экономическая № 28. – М.: ВИМС, 2009. – 157 с.
- Томторское месторождение (участок Буранный). URL: https://nedradv.ru/mineral/places/mineral-objinfo.cfm?tid_obj=f2f5e2370b07304ef3b5b58e4915fb84d (дата обращения: 23.11.2016).

23. Калашников А. О., Яковенчук В. Н., Пахомовский Я. А., Паниковский Т. Л., Коноплева Н. Г. и др. Ковдорский фоскорит-карбонатитовый комплекс как крупнейший источник скандия в России // 200 лет РМО : матер. Юбилейного съезда минералогического общества. – СПб., 2017. С. 83–85.

24. О формировании Федерального фонда резервных участков недр : Постановление Правительства РФ от 01.07.2013 № 552. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499031381> (дата обращения: 19.09.2018). 

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 3, pp. 51–54
DOI: 10.17580/gzh.2019.03.10

Rare metal potential of Karelia's garnet ore

Information about author

A. M. Ruchyev¹, Senior Researcher, ruchyov@krc.karelia.ru

¹Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

Abstract

Numerous garnet ore occurrences and deposits in the Louhi, Kem and Belomorsk municipal districts of the Republic of Karelia, recognized as part of the Arctic zone of the Russian Federation, are known. These products of multi-stage endogenous metamorphism of Late Archean sialic and mafic rocks contain at least 49.2 Mt of pyroaluminous garnet. Garnet is considered as a promising non-radioactive integrated source of critical strategic metals, based on the new results of the study of microcomponent composition of this rock-forming mineral, a well-known concentrator of scandium and yttrium-group rare-earth elements (TR) ($^{YTR} = Y + Sm + Eu + \dots + Lu$). These elements are most abundant in garnet of sialic rocks occurring dominantly as various mineral facies of paragneisses (Sc_2O_3 —211–521 g/t; TR_2O_3 —245–608 g/t; YTR —85.5–99.8%). Garnet of some varieties of mafic (apobasic) rocks also contains elevated rare-metal concentrations (Sc_2O_3 —145–147 g/t; TR_2O_3 —188–341 g/t; YTR —94.3–98.9%). In accordance with accepted minimum economic concentrations in ores (Sc_2O_3 —0.01%, TR_2O_3 —0.2%), scandium is a major useful constituent and TR is an associated constituent. Forecast scandium and TR resources were estimated on the basis of new data on their average concentrations in garnet and publications on garnet reserves and resources at some of its deposits and occurrences. The garnet ore targets studied are recognized as small ($Sc_2O_3 < 1000$ t) and medium-sized (occurrences Udinskoye: Sc_2O_3 —1088 t, associated $^{YTR}_2O_3$ —1443 t; Granatovy Prospect: Sc_2O_3 —5338 t, $^{YTR}_2O_3$ —6409 t) deposits, based on their scandium resources. The geological, geographic and economic conditions of Karelia are quite acceptable for creating and developing a scandium and YTR raw materials base and for launching rare-metal industries. Therefore, scandium and TR reserves at already known garnet ore localities should be evaluated and attempts to find new ones should be made. An acute problem is to develop technology for economic extraction of rare metals from garnet.

Keywords: garnet, ore occurrences and deposits, rare metals, rare-earth metals, scandium, yttrium, forecast resources.

References

- Weng Z., Jowitt S. M., Mudd G. M., Haque N. A. A Detailed Assessment of Global Rare Earth Element Resources: Opportunities and Challenges. *Economic Geology*. 2015. Vol. 110, Iss. 8. pp. 1925–1952.
- Goodenough K. M., Schilling J., Jonsson E., Kalvig P., Charles N. et al. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 72. pp. 838–856.
- Baolu Zhou, Zhongxue Li, Congcong Chen. Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals*. 2017. Vol. 7, Iss. 11. DOI: 10.3390/min7110203
- Paulick H., Machacek E. The global rare earth element exploration boom: An analysis of resources outside of China and discussion of development perspectives. *Resources Policy*. 2017. Vol. 52. pp. 134–153.
- Application guidance for Classification of field and probable reserves of hard minerals (of niobium, tantalum ore and rare earth elements). Moscow : FGU GKZ, 2007. 42 p.

- Available at: <http://docs.cntd.ru/document/9015641> (accessed: 19.09.2018).
- Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikentev I. V., Aristov V. V. et al. Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook. *Geology of Ore Deposits*. 2016. Vol. 58, No. 2. pp. 83–103.
- Kremenetskiy A. A., Kalish E. A. Complex rare metal deposits of Russia and major lines of increasing their investment attractiveness. *Razvedka i okhrana neдр*. 2014. No. 9. pp. 3–11.
- Naumov A. V. Review of the world market of rare-earth metals. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2008. Vol. 49, No. 1. pp. 14–22.
- Ruchyev A. M. Karelia's garnet – promising source of rare metals. *Role of Science in Regional and National Challenges – Basic and Applied Research: Proceedings of All-Russian Conference with international participation, devoted to the 70th anniversary of KarNTs RAN*. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2016. pp. 302–305.
- Ruchyov A. M. Karelian garnet as a promising source of scandium and rare-earth metals. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Ser. Geologiya dokembriya*. 2017. No. 11. pp. 30–42.
- State Cadastre of Mineral Deposits. Nonmetals. Ministry of Nature Management and Ecology of the Republic of Karelia, 2014. Available at: http://nedrark.karelia.ru/pasport_gkm/pasportb/gkm_main_b.php (accessed: 07.02.2017).
- Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Skamnitskaya L. S., Garanzha A. V., Ruchyev A. M. Garnet ores of Karelia. Petrozavodsk : KarNTs RAN, 2009. 208 p.
- Mikhailov V. P., Aminov V. N. (Eds.). Mineral and raw material base of the Republic Karelia. Petrozavodsk : Kareliya, 2006. Book 2: Non-metallic mineral resources. Underground waters and medical muds. 356 p.
- Gordienko V. V., Leonova V. A. (Eds.). Mica-bearing pegmatite of North Karelia (geology, mineralogy, geochemistry and genesis). Leningrad : Nedra, 1976. 367 p.
- Mikhailov V. A. Rare earth ore in the world: Geology, resources, economy. Kiev : Kievskiy universitet, 2010. 223 p.
- Kremenetskiy A. A., Arhipova N. A. Condition and prospects of development of MSB of rare metals. *Razvedka i okhrana neдр*. 2013. No. 4. pp. 35–44.
- Kashcheev I. D., Zemlyanoy K. G., Doronin A. V., Kozlovskikh E. Yu. New opportunities used in the acid-based process for aluminum oxide. *Novye ognepury*. 2014. No. 4. pp. 6–12.
- Borisenko L. F., Eremen N. Ya., Uskov E. D. Role of scandium in the improved integrated use of titanium–magnetite ore. *Gornaya promyshlennost*. 1997. No. 1. pp. 51–55.
- Seredin V. V. A new method for primary evaluation of the outlook for rare earth element ores. *Geology of Ore Deposits*. 2010. Vol. 52, No. 5. pp. 428–433.
- Bykhovskii L. Z., Potanin S. D. Commercial geological types of rare metal deposits. *Mineral raw materials. Ser. Economic-geological*. Moscow : VIMS, 2009. No. 28. 157 p.
- Tomtor deposit (Buranniy site). Information portal NedraDV. Available at: https://nedradv.ru/mineral/places/mineral-objinfo.cfm?id_obj=f2f5e2370b07304ef3b5b8e4915fb84d (accessed: 23.11.2016).
- Kalashnikov A. O., Yakovenchuk V. N., Pakhomovskii Ya. A., Panikorskii T. L., Konopleva N. G. et al. Kovdor phoscarite–carbonatite complex as the largest scandium source in Russia. *RMO is 200 : Proceedings of Anniversary Congress of Mineralogical Society*. Saint-Petersburg, 2017. pp. 83–85.
- Available at: <http://docs.cntd.ru/document/499031381> (accessed: 19.09.2018).

