

УДК 553.493.67. (470.22)

## РЕСУРСЫ ГРАНАТА И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ НА РУДОПРОЯВЛЕНИИ «ВЫСОТА-181» (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ)

**А. Г. Никифоров, А. М. Ручьев**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия*

На территории Лоухского района Республики Карелия, включенного в Арктическую зону Российской Федерации, расположено проявление метаморфогенно-метасоматических гранатовых руд «Высота-181». При его изучении выявлены и охарактеризованы многочисленные разновидности продуктивных горных пород. С учетом их размещения, минерального состава и технологических свойств выделены различные типы гранатовых руд. Гранат рассматривается в качестве перспективного нерадиоактивного комплексного источника стратегических критических редкоземельных металлов ( $TR = Y + La + Ce + \dots + Lu$ ) и скандия. Выполнено определение микрокомпонентного химического состава граната из его концентратов, характеризующих различные типы руд. Установлено, что пиральспитовому гранату из сиалических разновидностей руд свойственно промышленное содержание скандия ( $Sc_2O_3$  – 177,3–196,8 г/т), являющегося главным полезным компонентом, и преобладание элементов иттриевой группы ( $^{\wedge}TR = Y + Sm + \dots + Lu$ ) в составе сопутствующих TR ( $TR_2O_3$  – 130,2–139,2 г/т, доля  $^{\wedge}TR_2O_3$  – 91,6–97,2 %). Содержание редких металлов (PM) в гранате апобазитовых руд ( $Sc_2O_3$  – 72,2 г/т,  $TR_2O_3$  – 163,3 г/т) – меньше минимального промышленного. Определены прогнозные ресурсы граната и содержащихся в нем PM в различных типах руд, слагающих пригодный для открытой разработки массив горных пород. В мафических рудах ресурсы граната – 5,582 Мт, ресурсы PM в гранате, т:  $Sc_2O_3$  – 403,  $TR_2O_3$  – 911, в том числе  $Y_2O_3$  – 557,  $^{\wedge}TR_2O_3$  – 871. В сиалических рудах различных типов суммарные ресурсы граната с промышленным содержанием скандия – 5,633 Мт, ресурсы PM в гранате, т:  $Sc_2O_3$  – 1099,  $TR_2O_3$  – 776, в том числе  $^{\wedge}TR_2O_3$  – 714,  $Y_2O_3$  – 468. По прогнозным ресурсам скандия в гранате сиалических руд объект «Высота-181» соответствует рангу средних по запасам месторождений этого металла.

**Ключевые слова:** руда; скандий; редкоземельные металлы; иттрий; лантаноиды; уран; торий.

### **A. G. Nikiforov, A. M. Ruchyov. GARNET AND RARE-METALS RESOURCES OF THE VYSOTA-181 ORE OCCURRENCE, NORTH KARELIA**

A metamorphogenetic-metasomatic garnet ore occurrence, known as Vysota-181, is located in the Louhi District, Russian Karelia, which is part of the Arctic zone of the Russian Federation. The study of the ore occurrence has revealed many productive rock varieties. Various types of garnet ore have been identified, based on their distribution, mineral composition and industrial properties. Garnet is considered as a promising complex non-radioactive source of critical strategic rare-earth metals ( $TR = Y + La + Ce + \dots + Lu$ ) and scandium. The micro-component chemical composition of the garnet from its concentrates derived

from various ore types was analyzed. It has been shown that pyralispitic garnet from sialic ore varieties contains economic concentrations of scandium ( $Sc_2O_3$  – 177.3–196.8 g/t), a major useful component, and that yttrium-group elements ( ${}^YTR = Y+Sm+\dots+Lu$ ) predominate in the composition of associated TR ( $TR_2O_3$  – 130.2–139.2 g/t, the percentage of  ${}^YTR_2O_3$  is 91.6–97.2 %). The rare-metals concentration (RM) in garnet from apobasic ores ( $Sc_2O_3$  – 72.2 g/t,  $TR_2O_3$  – 163.3 g/t) is below the minimum economic concentration. The predicted resources of garnet and RM in the various ore types composing the rock massif which could be quarried by the open-pit method were estimated. Garnet resources in mafic ores are 5.582 Mt, RM resources in the garnet are (t):  $Sc_2O_3$  – 403,  $TR_2O_3$  – 911, including  $Y_2O_3$  – 557,  ${}^YTR_2O_3$  – 871. The total garnet resources with economic scandium concentrations in the sialic ores of various types are 5.633 Mt, RM resources in the garnet (t) are:  $Sc_2O_3$  – 1099,  $TR_2O_3$  – 776, including  ${}^YTR_2O_3$  – 714,  $Y_2O_3$  – 468. Vysota-181 is a medium-sized ore occurrence, based on predicted scandium resources in garnet from sialic ores.

**Key words:** ore; scandium; rare-earth metals; yttrium; lanthanoids; uranium; thorium.

## Введение

Используемые в передовых технологиях ряда индустриальных отраслей стратегически важные скандий и редкоземельные элементы (TR) иттриевой группы ( ${}^YTR = Y+Sm+Eu+\dots+Lu$  [Методические..., 2007, табл. 1]) в настоящее время являются высокорейтинговыми «критическими» металлами [Бортников и др., 2016]. Объективные причины их «критичности» – неоднократно обсуждавшиеся [Кременецкий, Калиш, 2014 и др.] особенности отечественной минерально-сырьевой базы (МСБ), такие как 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. Улучшение МСБ может быть достигнуто выявлением и введением в эксплуатацию новых источников редких металлов (РМ).

В качестве перспективного мономинерального нерадиоактивного комплексного источника скандия и  ${}^YTR$  рассматривается хорошо известный их природный концентратор – пиральспитовый гранат. Его запасы и прогнозные ресурсы только на оцененных карельских проявлениях и месторождениях гранатовых руд составляют не менее 49,2 Мт [Минерально-сырьевая..., 2006; Государственный..., 2017 и др.] и остаются невостребованными уже более восьмидесяти лет.

Опубликованные материалы исследований, направленных на выяснение редкометалльного потенциала гранатоворудных проявлений и месторождений, характеризуют преимущественно метаморфогенные объекты в беломоридах [Ручьев, 2017, 2019]. В этой статье приводятся новые сведения о содержании и прогнозных

ресурсах скандия и TR в гранате из руд метаморфогенно-метасоматического генезиса, полученные при изучении их проявления «Высота-181» на Хизоваарском участке Северо-Карельского зеленокаменного пояса (Лоухский муниципальный район Республики Карелия, 15 км к югу от поселка Сосновый).

## Специфика проявления гранатовых руд «Высота-181» и методы его изучения

Геологические особенности и района, и участка гранатоворудного проявления «Высота-181» достаточно полно охарактеризованы материалами предшествовавших исследований [Щипцов и др., 2009; Никифоров, 2017 и ссылки в них], поэтому здесь приводится лишь минимум информации, необходимый в контексте статьи.

Специфика проявления гранатовых руд «Высота-181» – наличие их многочисленных разновидностей с различным минеральным составом и структурно-текстурными особенностями, сформированных в результате многократного и пространственно дискретного проявления на относительно небольшой площади ( $\approx 3,5$  км<sup>2</sup>) деформационных и существенно метасоматических процессов преобразования гетерогенных метаморфических горных пород. Рациональный подход к освоению этого объекта предполагает выделение промышленных типов руд – совокупностей природных разновидностей гранатосодержащих пород, свойства которых позволяют применять к ним единую оптимальную технологию обогащения.

Работы по выяснению возможности выделения типов руд включали: геологическое и минералогическое картирование участка гранатового проявления, опробование, анализ данных определения минерального и химического со-

става природных разновидностей руд. Среднее содержание граната и сопутствующих промышленных минералов рассчитывалось путем статистической обработки результатов минералогического анализа рядовых и групповых (составных) проб.

При построении основанных на материалах полевых наблюдений и результатах минералогического анализа схем распределения промышленных минералов (граната, кианита, мусковита, ставролита), а также для получения параметров, необходимых при оценке прогнозных ресурсов, использовался программный пакет MapInfo.

Пробоподготовка и определение химического состава выполнялись специалистами Отдела минерального сырья и Аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН. Гранатовые концентраты извлекались из рядовых и объединенных проб с применением ранее разработанных [Щипцов и др., 2009] магнито-гравитационных схем обогащения руд. Содержание микрокомпонентов в мономинеральных концентратах, характеризующих состав граната различных типов руд, определялось с использованием квадрупольного масс-спектрометра X-SERIES 2 (Thermo Fisher Scientific) методом ICP MS (контроль по стандартным образцам СГД-1 и ВНВО-2; погрешность определения TR – 4,5–10 %, Sc – не более 13 %).

### **Фактический материал и его обсуждение**

На основе материалов детальной геологической съемки участка гранатоворудного проявления и анализа проб определены и охарактеризованы минеральные парагенезисы продуктивных гранатосодержащих метаморфогенно-метасоматических пород [Никифоров, 2015, 2017]. Результаты этой работы позволили выделить десять главных природных разновидностей гранатовых руд (символы минералов по: [Kretz, 1983]): 1 – гранатовые амфиболиты (Grt+Pl+Amf); 2 – гранат-биотитовые гнейсы (Grt+Bt+Pl+Qtz); 3 – гранатовые вторичные кварциты (Grt+Qtz); 4 – основные метасоматиты (Grt+St+Ky+Qtz±Ms) по субстрату метасоматитов кислотной фации (Grt+Ky+Qtz); 5 – метасоматиты передовых зон кислотного выщелачивания (Ky+Grt+Bt+Pl+Qtz) по амфибол-биотитовым гнейсам; 6 – основные метасоматиты (Grt+St+Pl+Qtz±Amf) по амфибол-биотитовым гнейсам; 7 – гранат-мусковитовые вторичные кварциты (Grt+Ms+Qtz); 8 – гранат-мусковитовые гнейсы (Grt+Ms+Pl+Qtz); 9 – поздние метасоматиты (Grt+Ky+Ms+Qtz) по ранним метасоматитам (Grt+Ky+Qtz); 10 –

метасоматиты (Grt+Ky+Ms+Qtz±Amf) по амфибол-биотитовым гнейсам.

Разновидности гранатовых руд с учетом их свойств и возможных вариантов обогащения разделены на три группы, соответствующие типам руд: I тип – гранатовые руды (подтипы: I-м – мафические, I-с – сиалические); II тип – ставролит-кианит-гранатовые руды; III тип – кианит-мусковит-гранатовые и мусковит-гранатовые руды (табл. 1, используется вышеприведенная нумерация разновидностей и типов руд).

Составлена схема размещения различных типов гранатовых руд на участке их проявления (рис. 1). Определены пространственные параметры, необходимые для оценки прогнозных ресурсов граната в массиве горных пород возвышенности Высота-181, геоморфологические особенности которой благоприятствуют открытой разработке, и выполнен их подсчет (табл. 1).

В ходе исследований впервые получены сведения о содержании РМ в пиральспитовом гранате из различных типов руд (табл. 2). Новые фактические данные подтверждают обогащенность этого минерала скандием и TR, характеризуют полный спектр лантаноидов, позволяют судить о соотношении их групп.

В гранате мафических руд I типа (подтип I-м) концентрация РМ меньше минимальной промышленной, за которую приняты значения содержания в рудах: Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,01 % [Михайлов, 2010], TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,2 % [Кременецкий, Архипова, 2013]. В гранате из сиалических руд I типа (подтип I-с), а также II и III типов содержание скандия больше минимального промышленного, что позволяет считать его главным полезным компонентом, а TR, содержание которых значительно меньше 0,2 %, – сопутствующими. Таким образом, с учетом современных требований к минеральному сырью в качестве перспективного источника скандия пока может рассматриваться только гранат сиалических разновидностей руд.

Гранат из I-с, II, III типов руд проявления «Высота-181» по показателю «ценность тонны руды» (суммарная стоимость потенциальных товарных продуктов, которые из нее могут быть получены), зависящему прежде всего от содержания дорогостоящего скандия, превосходит такой общепризнанный перспективный источник РМ, как красные шламы, а также гранат апобазитовых руд месторождения «Тербеостров» [Ручьев, 2017] и проявления «Участок Гранатовый» [Ручьев, 2019], но уступает метаморфогенному гранату из разновидностей сиалических гнейсов беломорид (рис. 2).

Таблица 1. Исходные данные и результаты подсчета прогнозных ресурсов граната на проявлении «Высота-181»

Table 1. Reference data and the results of the calculation of predicted garnet resources at Vysota-181

Типы руд* Ore types*	Разновидности руд* Ore varieties*	Исходные данные Reference data						Прогнозные ресурсы, т Predicted resources, t	
		S, м <sup>2</sup> , m <sup>2</sup>	H, м, m	V, м <sup>3</sup> , m <sup>3</sup>	X, % vol.	K	d, т/м <sup>3</sup> , t/m <sup>3</sup>	В разновидностях руд In ore varieties	В типах руд In ore types
I-м	1	303 885	40	12 155 000	14	0,8	4,1	5 581 760	5 581 760
I-с	2	2693	40	108 000	12	0,8	4,0	41 360	297 810
	3	26 713	40	1 069 000	12	0,5	4,0	256 440	
II	4	21 110	40	844 000	13,4	0,8	4,1	371 130	795 240
	5	5408	30	162 000	19,6	0,8	4,1	104 300	
III	6	23 050	30	692 000	14,1	0,8	4,1	319 800	4 540 030
	7	74 513	40	298 1000	10,7	0,8	4,1	1 046 040	
	8	32 026	40	1 281 000	15,7	0,8	4,1	659 680	
	9	135 891	40	5 436 000	19,6	0,6	4,1	2 620 850	
	10	69 417	30	2 083 000	5	0,5	4,1	213 460	

Примечание. \* – номера типов и природных разновидностей руд, пояснения в тексте; S – площадь блоков разновидностей руд; H – средняя высота блока (от уровня минимальных наблюдаемых абсолютных отметок рельефа на участке рудопроявления); V – объем гранатовой руды; X – среднее содержание граната в руде; K – коэффициент надежности прогноза [Коробейников, 2009]; d – удельный вес (плотность) граната.

Note. \* – the numbers of ore types and natural ore varieties; for explanation see the text; S – distribution area of ore varieties; H – average block height (from the minimum absolute topographic marks at the ore prospect); V – garnet ore volume; X – average garnet content of ore; K – the forecast reliability coefficient [Korobeinikov, 2009]; d – specific gravity (density) of garnet.

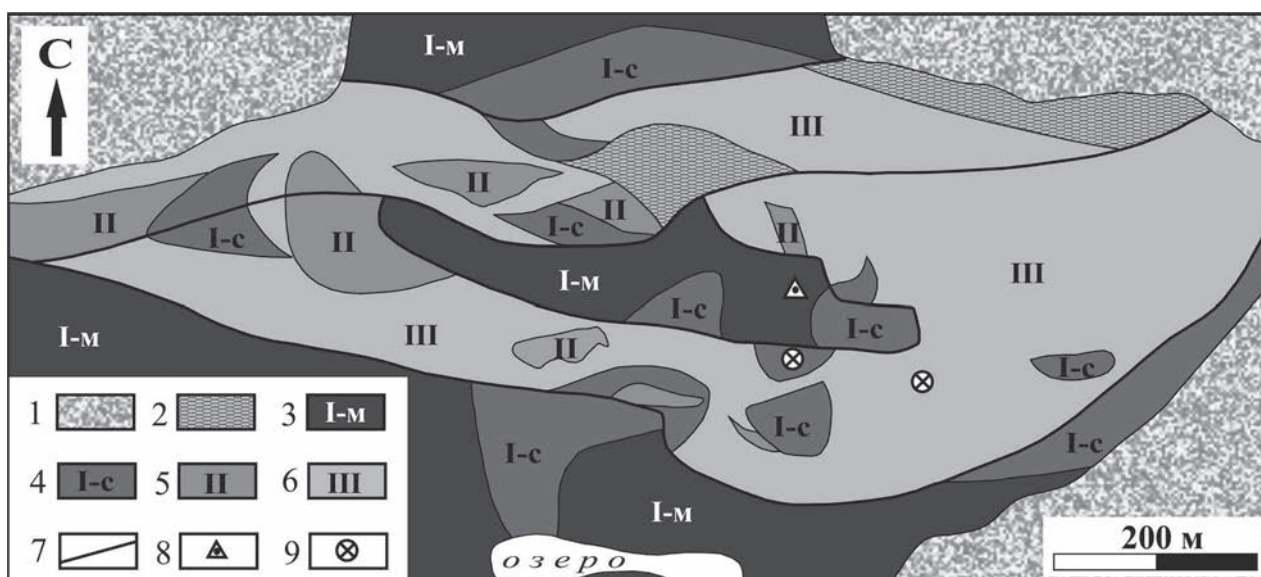


Рис. 1. Локализация различных типов гранатовых руд на участке «Высота-181»:

1 – четвертичные отложения; 2 – непродуктивные амфибол-биотитовые гнейсы; 3, 4 – I тип – гранатовые руды: 3 – мафические, подтип I-м; 4 – сиалические, подтип II-м; 5 – II тип – ставролит-кианит-гранатовые руды; 6 – III тип – кианит-мусковит-гранатовые и мусковит-гранатовые руды; 7 – границы геологических подразделений; 8 – тригопункт; 8 – опытные карьеры

Fig. 1. Location of various garnet ore types at Vysota-181 ore occurrence:

1 – Quaternary rocks; 2 – unproductive amphibole-biotite gneiss; 3, 4 – type I garnet ore: 3 – mafic, subtype I-m; 4 – sialic, subtype II-m; 5 – type II – staurolite-kyanite-garnet ore; 6 – type III – kyanite-muscovite-garnet and muscovite-garnet ores; 7 – boundaries of geological units; 8 – triangulation tower; 8 – experimental quarries

Состав TR в гранате из сиалических руд (табл. 2) характеризуется высокой долей элементов иттриевой группы (91,6–97,2%), но содержание этих сопутствующих метал-

лов меньше, чем в других объектах сравнения (рис. 2).

В соответствии с рекомендацией по первичной оценке редкоземельного рудного сы-

Таблица 2. Содержание РМ в гранате разных типов руд на объекте «Высота-181»

Table 2. Rare-metal content of garnet from various ore types at Vysota-181 ore occurrence

Компоненты Constituents	Содержание редких металлов в гранате, г/т Rare-metal content of garnet, g/t			
	Типы руд Ore types			
	I-м	I-с	II	III
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	72,24	177,31	194,03	196,48
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,87	86,18	81,31	83,12
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	0,67	1,42	2,26
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,41	1,56	3,43	5,43
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,43	0,24	0,45	0,74
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,19	1,24	2,16	3,26
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,87	1,16	1,41	1,71
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,06	0,60	0,68	0,77
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,54	5,20	5,13	5,59
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,86	1,40	1,36	1,45
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,98	11,70	11,40	11,89
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,41	2,71	2,64	2,80
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,85	8,11	8,29	8,72
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,61	1,17	1,18	1,27
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,36	7,57	8,15	8,93
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,58	1,08	1,21	1,28
Ln <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63,42	44,43	48,92	56,12
<sup>Y</sup> Ln <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	56,12	40,71	41,46	44,42
<sup>Y</sup> TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	155,98	126,89	122,77	127,54
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	163,29	130,60	130,24	139,23
Th	0,19	0,38	0,36	0,43
U	0,05	0,17	0,27	0,28

Примечание. Здесь и в табл. 3 / Here and in Tab. 3: Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+...+Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; <sup>Y</sup>Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+...+Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; <sup>Y</sup>TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = <sup>Y</sup>Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

рья [Середин, 2010] применительно к гранату использовано соотношение групп дефицитных (Nd, Tb, Dy, Y), потенциально дефицитных (Eu, Er) и избыточных (Ce, Ho, Tm, Yb, Lu) компонентов. 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 TR, фигуративные точки, характеризующие соотношение групп TR в пиральспитовом гранате из различных типов руд проявления «Высота-181», расположены в поле высокоперспективных рудных объектов (рис. 3).

Важным положительным свойством пиральспитового граната по сравнению со многими природными и техногенными рудами скандия и TR, в том числе красными шламами, является значительно более низкое содержание в нем тория и урана (табл. 2). Концентратам граната свойственны близкие к фоновым значения удельной эффективной активности естественных радионуклидов (<sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K) – 13–19 Бк/кг [Щипцов и др., 2009].

Таким образом, химические особенности граната из сиалических разновидностей руд проявления «Высота-181» вполне позволяют рассматривать этот минерал как возможный комплексный нерадиоактивный источник РМ с промышленно значимым содержанием скандия (177–196 г/т Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в качестве главного полезного компонента и высокоперспективным составом сопутствующих TR.

Сведения о содержании скандия и TR в пиральспитовом гранате из различных типов руд (табл. 2) в совокупности с результатами подсчета ресурсов граната (табл. 1) позволили определить прогнозные ресурсы РМ (табл. 3).

Согласно принятой схеме ранжирования [Быховский, Потанин, 2009, табл. 1] рудопроявление «Высота-181» по суммарным прогнозным ресурсам скандия в гранате сиалических руд I-с, II, III типов (табл. 2) соразмерно среднему месторождению этого металла.

Результаты выполненной оценки ресурсов заметно увеличивают редкометалльный потенциал карельского участка Арктической зоны



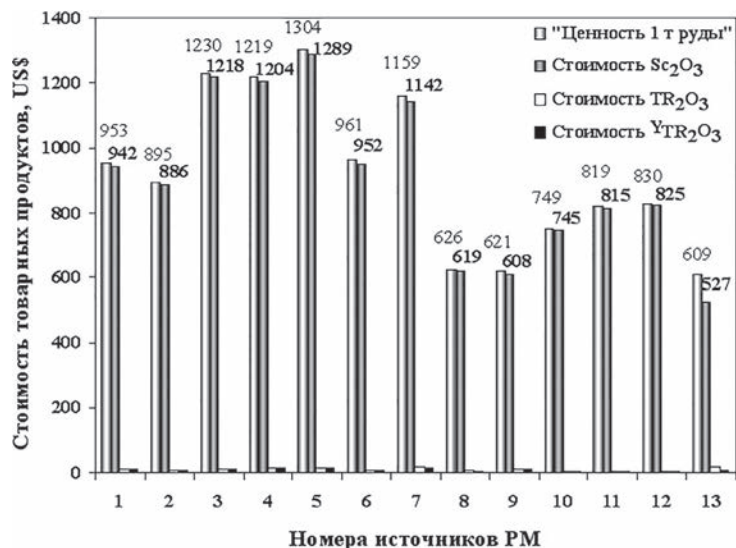


Рис. 2. Сравнение источников Sc и TR по показателю «ценность тонны руды»:

1–5 – гранат различных минеральных фаций гнейсов чупинской свиты; 6 – гранат кианитовых гнейсов проявления «Удинское»; 7 – гранат месторождения «Кительское»; 8 – гранат из руд проявления «Участок Гранатовый»; 9 – гранат месторождения «Тербеостров»; 10, 11, 12 – гранат из I-с, II, III типов руд проявления «Высота-181» соответственно; 13 – красный шлам («ценность» с учетом стоимости Ga металлического – 64,09 US\$); содержание PM по данным табл. 2 и [Кашчев и др., 2014; Ручьев, 2017, 2019]; цена товарных продуктов (оксидов) на 31.12.2015 г. [MineralPrices.com/ URL: [http://mineralprices.com/?hc\\_location=ufi](http://mineralprices.com/?hc_location=ufi); дата обращения: 11.03.2016 г.]

Fig. 2. Comparison of Sc and TR sources based on the value of 1 ton of ore:

1–5 – garnet of various mineral facies from Chupa gneiss; 6 – garnet of kyanite gneiss from the Udinskoye occurrence; 7 – garnet from the Kittelä deposit; 8 – garnet of ore from Granatovy prospect; 9 – garnet from the Terbeostrov deposit; 10, 11, 12 – garnet from ore of types I-s, II and III, Vysota-181 occurrence, respectively; 13 – red slurry («value» with regard for the cost of metallic Ga is 64.09 US\$); PM content based on the data in Tab. 2 and [Kashcheyev et al., 2014; Ruchyov, 2017, 2019]; the cost of commercial products (oxides) as of 31.12.2015 [MineralPrices.com / URL: [http://mineralprices.com/?hc\\_location=ufi](http://mineralprices.com/?hc_location=ufi); date of application: 11.03.2016]

Таблица 3. Прогнозные ресурсы оксидов редких металлов в гранате рудопроявления «Высота-181»

Table 3. Predicted rare-metal oxide resources in garnet from Vysota-181 ore occurrence

Компоненты Constituents	Прогнозные ресурсы оксидов редких металлов, т Predicted rare-metal oxide resources, t				
	Типы руд / Ore types				
	I-м	I-с	II	III	I-с+II+III
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	403,2	52,8	154,3	892,0	<b>1099,2</b>
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	557,4	25,7	64,7	377,4	<b>467,7</b>
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,1	0,2	1,1	10,3	11,6
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,0	0,5	2,7	24,7	27,8
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,4	0,1	0,4	3,4	3,8
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,2	0,4	1,7	14,8	16,9
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,4	0,3	1,1	7,8	9,2
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,9	0,2	0,5	3,5	4,2
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42,1	1,5	4,1	25,4	31,0
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,4	0,4	1,1	6,6	8,1
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	83,6	3,5	9,1	54,0	66,6
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,0	0,8	2,1	12,7	15,6
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60,6	2,4	6,6	39,6	48,6
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,0	0,3	0,9	5,8	7,1
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63,4	2,3	6,5	40,5	49,3
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,8	0,3	1,0	5,8	7,1
Ln <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	354,0	13,2	38,9	254,8	306,9
YLn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	313	12	33	202	247
YTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	871	38	98	579	<b>714</b>
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	911	39	104	632	<b>775</b>

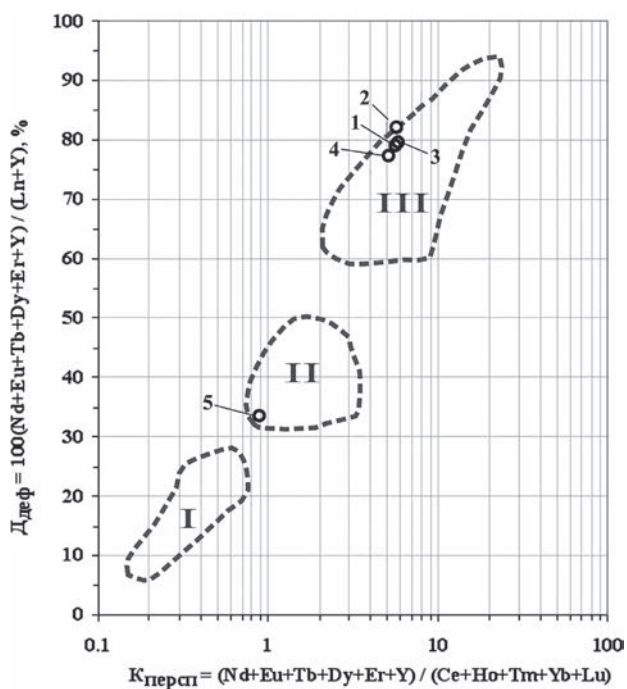


Рис. 3. Оценка перспективности состава TR в гранате с учетом соотношения групп дефицитных и избыточных компонентов.

Арабскими цифрами пронумерованы фигуративные точки составов TR: 1–4 – в гранате руд: 1 – I-м подтипа; 2 – I-с подтипа; 3 – II типа; 4 – III типа; 5 – в красном шламе (содержание по: [Кашеев и др., 2014]); поля перспективности рудных объектов [по: Середин, 2010] околнурены пунктиром и обозначены римскими цифрами: I – неперспективные, II – перспективные, III – высокоперспективные

Fig. 3. Evaluation of the TR content of the garnet with regard for the ratio of groups of deficient and excess constituents.

Arabic numbers are used to indicate the figurative points of TR composition: 1–4 – in ore garnet: 1 – subtype I-m; 2 – subtype I-s; 3 – type II; 4 – type III; 5 – in red slurry (content after [Kashcheyev et al., 2014]); promising fields of ore bodies [after Seredin, 2010] are delineated by a dotted line and are indicated by Roman numbers: I – non-promising, II – promising, III – highly promising

Российской Федерации, который с учетом ранее опубликованных сведений [Ручьев, 2019] теперь составляет, т:  $Sc_2O_3$  – 8320,  $TR_2O_3$  – 10381, в том числе  ${}^YTR_2O_3$  – 9803,  $Y_2O_3$  – 6638.

Приращение ресурсной базы РМ в области супракрустальных образований Северо-Карельского зеленокаменного пояса возможно при целенаправленном изучении уже известных гранатоворудных объектов и многочисленных участков развития гранатосодержащих пород (Унияярви, Тирозеро и др.).

Следует отметить, что карельские гранатовые руды часто бывают комплексными, так как кроме граната содержат и другие промышленные минералы. В этом отношении проявление «Высота-181» не является исключением, из его руд кроме граната может быть извлечено, Мт:

кианита – 0,8; мусковита – 0,9; ставролита – 0,13. Попутное получение нескольких товарных продуктов будет способствовать снижению затрат на добычу граната – источника РМ.

## Выводы

Особенности микрокомпонентного химического состава позволяют рассматривать пиральспитовый гранат сиалических руд проявления «Высота-181» как перспективный мономинеральный нерадиоактивный комплексный источник стратегических критических металлов с промышленным содержанием скандия ( $Sc_2O_3$  – 177–196 г/т), главного полезного компонента, и высокой долей иттриевой группы в составе сопутствующих редкоземельных элементов ( $TR_2O_3$  – 130–139 г/т, из них  ${}^YTR_2O_3$  – 92–97 %).

Прогнозные ресурсы редких металлов в гранате сиалических руд (ресурсы граната – 5,633 Мт) составляют, т:  $Sc_2O_3$  – 1099,  $TR_2O_3$  – 776, в том числе  ${}^YTR_2O_3$  – 714,  $Y_2O_3$  – 468. По ресурсам скандия объект «Высота-181» соответствует рангу средних по запасам месторождений этого металла.

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

Авторы благодарят А. М. Пыстина и Д. В. Жирова за рецензирование статьи.

Исследования выполнены в рамках темы НИР Института геологии КарНЦ РАН «Минерагения, технологическая и эколого-экономическая оценка потенциальных минерально-сырьевых ресурсов территории Республики Карелия» ПФНИ ГАН (№ гос. рег. АААА-А18-118020290175-2).

## Литература

- 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., Потанин С. Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений // Минеральное сырье. Сер. геол.-экон. № 28. М.: РИС ВИМС, 2009. 157 с.
- Государственный кадастр месторождений. Неметаллы / Управление недропользования Министерства по природопользованию и экологии Республики Карелия [Электронный ресурс]. URL: <http://nedrark.karelia.ru/> (дата обращения: 07.02.2017 г.).

Кашеев 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.

Коробейников А. Ф. Прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 253 с.

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.

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. Кн. 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.

Никифоров А. Г. Корреляция результатов минералого-технологического картирования с геологическими условиями участка «Высота-181» // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 149–153.

Никифоров А. Г. Факторы контроля комплексных гранатовых руд месторождения «Высота-181» // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 11. С. 43–58. doi: 10.17076/geo651

Ручьев А. М. Карельский гранат – перспективный источник скандия и редкоземельных металлов // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 11. С. 30–42. doi: 10.17076/geo621

Ручьев А. М. Редкометалльный потенциал гранатовых руд Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 51–54. doi: 10.17580/gzh.2019.03.10

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

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

Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // Am. Mineral. 1983. Vol. 68. P. 277–279.

Поступила в редакцию 05.07.2019

## References

Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikent'ev I. V., Aristov V. V., Lalomov A. V., Murashov 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]. *Geol. rudnykh mestorozhdenii* [Geol. Ore Deposits]. 2016. Vol. 58, no. 2. P. 97–119.

Bykhovskii L. Z., Potanin S. D. Geologo-promyshlennyye tipy redkometall'nykh mestorozhdenii [Geological-industrial types of rare metals deposits]. *Mineral'noe syr'e. Ser. geologo-ekonomicheskaya* [Mineral Raw Materials. Geol. and Economical Ser.]. Moscow: VIMS, 2009. No. 28. 157 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).

Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdenii i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Niobievye, 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. Podzemnye 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.

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

Korobeynikov A. F. Prognozirovaniye i poiski mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh [Forecasting and prospecting of mineral deposits]. Tomsk: TPU, 2009. 253 p.

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

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

Mikhailov V. A. Redkozemel'nye rudy mira: geologiya, resursy, ekonomika [Rare-earth ores of the world: geology, resources, economy]. Kiev: Kievskii universitet, 2010. 223 p.

Nikiforov A. G. Korrelyatsiya rezul'tatov mineralogo-tekhnologicheskogo kartirovaniya s geologicheskimi usloviyami uchastka "Vysota-181" [Correlation of the results of mineralogical and technological mapping with



the geological conditions at the Vysota-181 locality]. *Sb. st. IX Ross. seminara po tekhnologicheskoi mineralogii, Magnitogorsk* [Proceed. IX Russ. Seminar on Technological Mineralogy, Magnitogorsk]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 149–153.

*Nikiforov A. G.* Faktory kontrolya kompleksnykh granatovykh rud mestorozhdeniya “Vysota-181” [Complex garnet ore control factors for the Vysota-181 deposit]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 11. P. 43–58. doi: 10.17076/geo651

*Ruch'ev A. M.* Karel'skii granat – perspektivnyi istochnik skandiya i redkozemel'nykh metallov [Karelian garnet as a promising source of scandium and rare-earth metals]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2017. No. 11. P. 30–42. doi: 10.17076/geo621

*Ruch'ev A. M.* Redkometall'nyi potentsial granatovykh rud Karelii [Rare-metal potential of Karelia's

garnet ores]. *Gornyi zhurn.* [Mining J.]. 2019. No. 3. P. 51–54.

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

*Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Skamnitskaya L. S., Garanzha A. V., Ruch'ev A. M.* Granatovye rudy Karelii [Garnet ores of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2009. 208 p.

*Kretz R.* Symbols for rock-forming minerals. *Am. Mineral.* 1983. Vol. 68. P. 277–279.

Received July 05, 2019

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Никифоров Александр Геннадьевич**

младший научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: eoaster@yandex.ru

### **Ручьев Андрей Михайлович**

старший научный сотрудник  
Институт геологии КарНЦ РАН,  
Федеральный исследовательский центр  
«Карельский научный центр РАН»  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: ruchyov@krc.karelia.ru  
тел.: 89214559451

## CONTRIBUTORS:

### **Nikiforov, Alexander**

Institute of Geology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia  
e-mail: eoaster@yandex.ru

### **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