

## Скандиевый ресурсный потенциал Пудожгорского титаномагнетитового месторождения (Южная Карелия)

На примере Пудожгорского месторождения показано, что титаномагнетитовые магматогенные руды дифференцированных интрузивов лудиковийской габбро-диабазовой формации – перспективный источник стратегического критического металла, скандия. Прогнозные валовые ресурсы  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  этого месторождения (руда – 316,689 Мт,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  – 38,82 г/т) – 12,3 кт. В пироксен-амфиболовом концентрате (67,77 Мт,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  – 125 г/т), который может быть выделен из силикатных хвостов обогащения руд (187,52 Мт), сосредоточены извлекаемые ресурсы  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  – 8,4 кт, а также ресурсы, кт:  $\text{Li}_2\text{O}$  – 5,5;  $\text{ZrO}_2$  – 13,5;  $\text{TR}_2\text{O}_3$  – 15,1, из них  ${}^Y\text{TR}_2\text{O}_3$  – 8,2. Рекомендуются геологоразведочные мероприятия по доизучению карельских титаномагнетитовых объектов с подсчетом и утверждением запасов как главных, так и многочисленных сопутствующих полезных компонентов комплексных руд.

*Ключевые слова:* титаномагнетитовая руда, редкие металлы, скандий, иттрий, лантаноиды, прогнозные ресурсы.

A. M. RUCH'EV (IG KarRC RAS)

## Potential scandium resources of the Pudozhgorskoye titanomagnetite deposit, South Karelia

In the present contribution, the Pudozhgorskoye deposit is used as an example to show that magmatogene titanomagnetite ores in the differentiated intrusives of the Ludicovian gabbro-diabase formation are a promising source of scandium, a critical strategic metal. The inferred bulk  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  resources of the deposit (ore – 316,689 Mt,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  – 38,82 g/t) are estimated at 12,3 kt. Pyroxene-amphibole concentrate (67,77 Mt,  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  – 125 g/t), which can be separated from silicate tailings in ore processing (187,52 Mt), contains recoverable  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  resources of 8,4 kt, as well as other resources, kt:  $\text{Li}_2\text{O}$  – 5,5;  $\text{ZrO}_2$  – 13,5;  $\text{TR}_2\text{O}_3$  – 15,1, of which 8,2 kt  ${}^Y\text{TR}_2\text{O}_3$ . Geological exploration is recommended to study Karelia's titanomagnetite targets in more detail and to calculate and approve the reserves of the major and abundant minor commercial elements of complex ores.

*Keywords:* titanomagnetite ore, rare metals, scandium, yttrium, lanthanide, inferred resources.

*Для цитирования:* Ручьев А. М. Скандиевый ресурсный потенциал Пудожгорского титаномагнетитового месторождения (Южная Карелия) // Региональная геология и металлогения. – 2022. – № 89. – С. 77–86. DOI: 10.52349/0869-7892\_2022\_89\_77-86

**Введение.** Вовлечение в переработку титаномагнетитовых руд, ресурсный потенциал которых на территории Мурманской области и Республики Карелия (РК) оценивается как значительный, рассматривается в качестве одного из мероприятий по предотвращению прогнозируемого дефицита железорудного сырья в Северо-Западном федеральном округе [12].

Карельские титаномагнетитовые объекты представлены месторождениями: Пудожгорское (забалансовые запасы руды – 316,7 Мт, ресурсы  $P_1 + P_2$  – 200 Мт), Койкарское (забалансовые запасы руды – 314,1 Мт), Еletzозерское (запасы руды – 102,3 Мт), Велимякское (запасы руды  $\approx$  130 Мт), а также проявлениями: Онежское (ресурсы  $P_2$  – 2340 Мт руды), Пелгозеро-1, -2 и -3 (суммарные ресурсы  $P_1$  – 301,8 Мт руды), Гальозерское, Повенецкое, Палалахтинское и др. [11]. Перспектива промышленного освоения делает необходимым доизучение этих объектов с учетом

комплексного характера руд. Последние рассматривались как минеральное сырье для получения железа, титана, ванадия, меди, благородных металлов, но недостаточно охарактеризованы в отношении скандия, типичного сопутствующего элемента магматогенных титаномагнетитовых руд [1; 2; 5; 9]. Обоснованное включение скандия, стратегически важного [13] критического [3] металла, в список полезных компонентов карельских комплексных титаномагнетитовых руд может значительно увеличить их ценность. Кроме того, практическую значимость приобретает ответ на вопрос, какие редкие металлы (РМ) вместе с ванадием и скандием присутствуют в этом минеральном сырье.

Изложенные далее сведения дают первое представление о редкометалльном (Sc, TR и др.) ресурсном потенциале наиболее изученного титаномагнетитового месторождения Онежской рудной провинции.

**Объект исследования.** Пудожгорское месторождение комплексных (Ti, V, Fe, Pd, Pt, Au, Cu, Ag) титаномагнетитовых руд расположено в Пудожском муниципальном районе РК, вблизи поселка Пудожгорский и деревни Римское (рис. 1). Описание его геологических особенностей приводится в многочисленных статьях, а наиболее детальное и всестороннее – в монографии [18], дающей также подробную информацию о геологоразведочных, технологических и других работах по изучению месторождения. Сведения из нее использованы в следующей краткой характеристике объекта исследования.

Пудожгорское месторождение локализовано в субпластовом интрузиве пород (возраст –  $1984 \pm 8$  млн лет) людиковийской габбро-диабазовой формации, прорывающем граниты и гранито-гнейсы нерасчлененного архей-протерозойского комплекса. Интрузив имеет протяженность более 25 км, мощность 100–140 м, пологое падение на юго-запад. Признаки его выклинивания на глубине отсутствуют. Магматические породы дифференцированы по составу от основных (долериты титаномагнетит-авгит-лабрадоровые) в нижней зоне до средних (диориты, кварцевые диориты, монцодиориты) и кислых (монцограниты) в верхней и подверглись интенсивным изменениям

(амфиболизация, эпидотизация, хлоритизация и др.). В северо-западной части интрузива, на разведочном участке (рис. 1), в долеритах нижней зоны выделен рудный горизонт (мощностью 20–25 м) с повышенным содержанием титаномагнетита, залегающий в 25–30 м выше подошвы интрузивного тела и субпараллельно ей. В этом горизонте по бортовому содержанию валового железа 20 % оконтурена залежь вкрапленных титаномагнетитовых руд, мощность которой изменяется от 7,4 до 23,2 м при среднем значении 15 м. Главные минералы руд, % об.: титаномагнетит – 14,8–49,2; ильменит – 3 (в метровом интервале верхов залежи – до 18); плагиоклаз и кварц – 9,4–57; пироксен (авгит), амфиболы (железистая роговая обманка, ферроактинолит, актинолит), биотит, хлорит – 27,1–50,8.

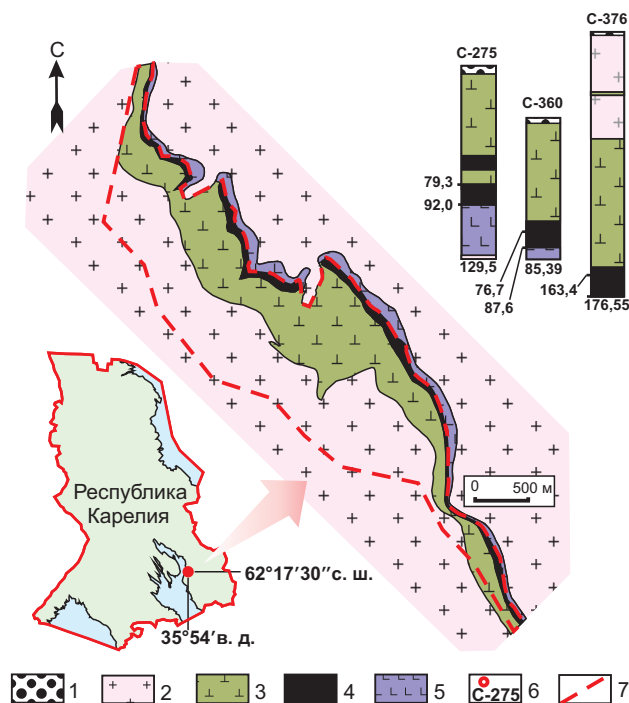
В контурах рудной залежи подсчитаны запасы руды (316,689 Мт, среднее содержание, %: Fe<sub>валовое</sub> – 28,9; TiO<sub>2</sub> – 8,14; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,43; Cu – 0,13) и оценены прогнозные ресурсы благородных металлов (Au ≈ 101,7, Pt ≈ 54,7 и Pd ≈ 137,5 т).

Разработанные технологии обогащения и металлургического передела позволяют получать из среднетитанистых пудожгорских руд или ванадийсодержащий чугуны, или легированную сталь, а также титановый и ванадиевый продукты. Доказана возможность извлечения из силикатных хвостов обогащения руд концентрата сульфидов меди с высоким содержанием благородных металлов. Установлена пригодность вскрышных пород для производства высококачественного щебня, определены и утверждены их запасы ( $C_1 + C_2 = 202,3$  млн м<sup>3</sup>). Технико-экономическими расчетами подтверждена рентабельность отработки месторождения.

Обращалось внимание на благоприятные природные предпосылки и экономическую целесообразность создания горнодобывающего и металлургического кластера в Онежской рудной провинции, минерально-сырьевая база (МСБ) которой включает крупные запасы хрома (Аганозерское месторождение), железа, титана, ванадия, ресурсы никеля, магния, благородных металлов. При этом Пудожгорское месторождение рассматривалось как первоочередное для промышленного освоения.

**Материалы и методы.** Каменный материал, полученный в 1950–1952 гг. в ходе предварительной разведки Пудожгорского месторождения, утрачен. В работе использованы сохранившиеся в коллекции Н. Н. Трофимова шлифы и дубликаты 24 проб руды из керна скважин 275, 360, 376, пробуренных на разведочном участке в границах проектного карьера открытой добычи руд (рис. 1). Результаты предшествующего исследования этих проб, отражающих специфику разреза рудной залежи, стали основой для ее минералогической, петрохимической характеристики и оценки прогнозных ресурсов благородных металлов [18].

Пробоподготовка, выделение минеральных фракций, определение микрокомпонентного



**Рис. 1.** Пудожгорское месторождение: местоположение на территории Республики Карелия, геологическая схема разведочного участка, колонки опробованных скважин (по [18], с изм.)

1 – четвертичные отложения; 2 – гранитоиды AR-PR комплекса; 3–5 – Пудожгорский интрузив: 3 – верхняя зона (диориты, кварцевые диориты и монцодиориты), 4, 5 – нижняя зона (долериты); 4 – рудный горизонт (цифры на колонках – глубина границ рудной залежи, глубина скважин, м), 5 – подрудный горизонт; 6 – скважины и их номера; 7 – контур подсчета запасов титаномагнетитовых руд категорий А, В, С<sub>1</sub>

химического состава руд и минералов выполнены в Центре коллективного использования Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Россия).

Состав породообразующих минералов изучался в полированных шлифах с углеродным напылением методом EPMA с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH (Tescan, Брно, Чехия), оснащенного энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350, детектором SDD X-Act3 (Oxford Inca Energy, Оксфорд, Великобритания). Программное обеспечение – Oxford Instruments INCA 4.07, Microanalysis Suite Issue 17+SP1. Условия анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 20 мА, диаметр пучка – 2 мкм, количество каналов – 1, размер спектра – 0–10 кэВ, время накопления – 70 сек. Калибровочные стандарты и рентгеновские линии – Si–Ka, Ca–Ka (волластонит), Al–Ka ( $Al_2O_3$ ), Mg–Ka (MgO), Ti–Ka (Ti), Mn–Ka (Mn), Fe–Ka (металл Fe), Na–Ka (альбит), K–Ka (ортоклаз).

Содержание РМ в руде и минеральных концентратах определено методом ICP MS с применением квадрупольного масс-спектрометра Thermo Scientific X-Series 2 (Thermo Fisher Scientific, Бремен, Германия). Для контроля использовались стандартные образцы СГД-1 и ВНВО-2. Описание аналитических процедур с оценкой качества результирующих данных опубликовано [16].

**Фактические данные и их обсуждение.** Новые данные о содержании РМ в образцах руды Пудожгорского месторождения и результаты их статистической обработки представлены в табл. 1.

Используя установленный при подсчете запасов параметр рудной залежи – массу сосредоточенной в ней титаномагнетитовой руды (316,689 Мт) и сведения о среднем содержании микрокомпонентов (табл. 1), можно оценить прогнозные валовые ресурсы РМ, кг:  $Li_2O$  – 25,68;  $BeO$  – 0,64;  $Sc_2O_3$  – 12,30;  $Ga_2O_3$  – 10,91;  $SrO$  – 33,86;  $Y_2O_3$  – 11,05;  $ZrO_2$  – 64,47;  $Nb_2O_5$  – 4,23;  $Ln_2O_3$  – 34,77;  $HfO_2$  – 0,76;  $Ta_2O_5$  – 0,31;  $TR_2O_3$  – 45,82;  ${}^YTR_2O_3$  – 20,61 ( $TR = Y + Ln$ ;  $Ln = La + Ce + \dots + Lu$ ;  ${}^YTR = Y + Sm + Eu + \dots + Lu$  [10, табл. 1]).

Судя по результатам оценки, в пудожгорской руде «традиционным» полезным компонентам (Ti, V, Fe, Pd, Pt, Au, Cu, Ag) сопутствует значительное количество РМ, имеющих важное практическое значение: Zr, Nb, Y,  ${}^YTR$ , Sc, Li включены в перечень стратегических, а Nb, Y, Sc, TR, Ga, Li, Hf, Sr – «критических» металлов. Однако современный уровень всесторонней (геологической, технологической) изученности титаномагнетитовых руд и их составляющих пока позволяет уверенно говорить только о возможности добычи скандия.

Клинопироксены и амфиболы, входящие в состав титаномагнетитовых руд, уже давно рассматриваются и целенаправленно изучаются как перспективный промышленный источник скандия [1; 2]. Для извлечения этого металла из

силикатов разработаны технологии [5; 7], которые могут быть адаптированы к пудожгорским рудам. Представляется, что внимания также заслуживают РМ, присутствующие в главных минералах-концентраторах скандия и поэтому неизбежно вовлекаемые в процессы гидрометаллургического передела.

В рудной залежи Пудожгорского месторождения массы минералов-концентраторов скандия и содержание РМ в них ранее не определялись. Нужная для оценки извлекаемых ресурсов скандия информация о среднем минеральном составе рудной залежи получена расчетным путем с использованием компьютерной программы МС (Modal Composition) [19], а также опубликованных данных количественного химического силикатного анализа проб и результатов определения макрокомпонентного состава минералов методом EPMA, дополненных новыми сведениями о биотите, хлорите, ильмените (табл. 2). Малая величина показателя расхождения исходных (табл. 2, столбец 2) и расчетных (столбец 3) данных ( $Residual = 0,0352$ ) свидетельствует о хорошем соответствии моделируемого минерального и усредненного химического составов руды.

Образцы проанализированной выборки (табл. 1) характеризуют микрокомпонентный состав титаномагнетитовых руд на разных уровнях разреза рудной залежи, вскрытой тремя пространственно удаленными друг от друга буровыми скважинами. Это позволяет охарактеризовать степень изменчивости содержания РМ, и в первую очередь скандия. В качестве меры изменчивости используется коэффициент вариации (показатель  $V$  в табл. 1). Его величина, установленная для скандия, существенно меньше, чем у большинства РМ (табл. 1) и макрокомпонентов химического состава руд. Коэффициенты вариации содержания последних, рассчитанные по ранее опубликованным данным силикатного анализа тех же образцов [18, табл. 6.2–6.4], следующие, %:  $SiO_2$  – 18,2;  $TiO_2$  – 20,6;  $Al_2O_3$  – 24,0;  $Fe_2O_3$  – 25,2;  $FeO$  – 15,4;  $MnO$  – 16,5;  $MgO$  – 11,8;  $CaO$  – 25,7;  $Na_2O$  – 29,5;  $K_2O$  – 37,8. Наименьшая изменчивость содержания свойственна оксиду магния, преимущественно входящего в состав главных (пироксены, амфиболы) и второстепенных (биотиты, хлориты) концентраторов скандия, что указывает на их более равномерное распределение в рудной залежи по сравнению с другими минералами. Величина коэффициента вариации, определенная для скандия (7,5 %), свидетельствует о малой изменчивости содержания и позволяет считать его среднее значение (25,31 г/т) представительным для всей рудной залежи.

Распределение оксида скандия в компонентах руды (табл. 3) рассчитано с использованием сведений о ее массе, количественном минеральном составе (табл. 2) и содержании скандия в минералах. В рудной залежи ильменит – преимущественно продукт распада твердого раствора, наблюдающийся в виде микроскопических пластинок и эмульсионных обособлений в титаномагнетите,

## Содержание редких металлов в образцах титаномагнетитовой

Элемент	Номер образца (номер скважины / глубина отбора, м) по [18]												
	275/81,8	275/82,8	275/86,8	275/91,5	360/76,7	360/77	360/78	360/79	360/80	360/81	360/82	360/82,5	360/83
Li	33,06	29,35	27,43	30,93	45,21	39,07	36,64	44,92	46,23	44,91	39,76	36,52	40,01
Be	0,40	0,44	0,64	0,69	1,20	0,34	0,55	0,59	0,73	0,73	0,78	0,79	0,71
Sc	25,95	23,40	22,03	24,89	26,60	25,31	24,65	25,00	26,10	24,72	24,39	25,34	25,85
Ga	25,72	24,97	25,67	22,77	24,65	25,57	23,90	25,29	26,72	24,07	26,40	26,58	25,78
Sr	66,46	59,89	98,24	121,40	90,59	55,17	68,10	48,66	49,87	78,92	76,23	60,54	51,21
Y	24,81	22,71	20,55	25,05	39,82	23,88	28,53	29,57	29,37	30,01	25,20	25,48	26,24
Zr	147,00	135,60	116,40	125,70	228,30	130,80	147,60	170,70	160,70	165,60	131,20	144,10	136,00
Nb	9,51	8,49	6,93	7,08	13,67	8,76	8,93	10,33	9,76	9,86	8,60	9,95	9,63
La	10,84	9,33	8,00	10,13	16,44	9,73	14,01	14,84	12,40	11,72	10,02	10,16	10,02
Ce	23,74	21,77	18,98	22,69	37,10	22,45	37,04	33,07	27,53	27,78	23,59	25,41	23,23
Pr	3,42	2,92	2,56	3,22	5,21	3,13	4,81	4,37	3,88	3,77	3,24	3,27	3,29
Nd	15,12	14,01	11,93	14,87	24,32	14,44	21,77	19,82	17,77	18,11	14,94	15,29	15,20
Sm	4,01	3,56	3,33	3,86	6,56	3,85	5,24	4,96	4,79	4,80	4,10	4,33	4,08
Eu	1,23	1,13	1,10	1,31	1,90	1,13	1,50	1,39	1,37	1,47	1,30	1,26	1,24
Gd	4,78	4,38	3,97	4,77	7,79	4,79	6,11	5,95	5,85	6,00	4,86	5,03	5,31
Tb	0,81	0,75	0,69	0,78	1,30	0,79	0,99	0,97	0,95	0,97	0,88	0,88	0,87
Dy	5,20	4,81	4,46	5,33	8,46	5,17	6,27	6,36	6,12	6,44	5,40	5,37	5,52
Ho	1,10	0,99	0,90	1,11	1,78	1,07	1,33	1,32	1,32	1,33	1,11	1,13	1,15
Er	3,11	2,81	2,56	3,03	5,02	3,12	3,68	3,76	3,77	3,79	3,18	3,32	3,21
Tm	0,45	0,42	0,40	0,48	0,75	0,43	0,54	0,57	0,56	0,56	0,45	0,46	0,48
Yb	2,86	2,53	2,36	2,91	4,58	2,67	3,22	3,39	3,35	3,44	2,69	2,83	3,02
Lu	0,41	0,37	0,36	0,42	0,65	0,41	0,50	0,48	0,48	0,52	0,42	0,43	0,43
Hf	3,48	3,22	2,83	3,00	5,86	3,27	3,44	4,53	4,22	4,42	3,25	3,61	3,58
Ta	0,77	0,76	0,60	0,58	1,02	0,72	0,71	0,75	0,76	0,74	0,61	0,71	0,73
Th	1,84	1,75	1,61	1,87	2,80	1,70	2,08	2,35	2,18	2,33	1,85	1,81	1,94
U	0,36	0,35	0,41	0,33	0,58	0,35	1,01	0,51	0,44	0,48	0,37	0,41	0,37

Примечание: X – среднее арифметическое по выборке из 24 образцов; s – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации ( $V = 100 s/X$ ).

от которого практически неотделим. Поэтому содержание скандия в пудожгорском титаномагнетите – 16,7 г/т [1, табл. 4] принято в качестве показателя, характеризующего суммарную массу титаномагнетита и ильменита. В расчетах использованы сведения [6] о максимальном содержании скандия в полевых шпатах и среднем содержании в биотитах из базитов. Сделаны допущения, что содержание скандия в хлорите такое же, как в биотите, а количество скандия в акцессорном апатите пренебрежимо мало. Вычитанием из массы  $Sc_2O_3$  в руде (12 294 т) его суммарной массы в титаномагнетите и ильмените, биотите, хлорите, плагиоклазе (3850 т) определено, что в клинопироксене и амфиболе сконцентрировано 8444 т  $Sc_2O_3$ , то есть 68,7 % от его количества в руде. Расчетное содержание  $Sc_2O_3$  (частное от деления

массы этого оксида в пироксене и амфиболе на их суммарную массу) – 124,59 г/т.

Для оценки адекватности результатов расчета (табл. 3) выполнено определение содержания  $Sc_2O_3$  в пироксен-амфиболовом концентрате, выделенном из образцов пудожгорских титаномагнетитовых руд (табл. 4).

Полученное на основе химико-аналитических данных (табл. 4) среднее содержание  $Sc_2O_3$  в пироксен-амфиболовом концентрате – 124,85 г/т близко к расчетному – 124,59 г/т (табл. 3), а при округлении до целых чисел равно ему, что подтверждает адекватность величин (табл. 2, 3), установленных вышеописанным способом.

При пирометаллургической переработке титаномагнетитового концентрата скандий не

## руды Пудожгорского месторождения, г/т

Элемент	Номер образца (номер скважины / глубина отбора, м) по [18]											X, г/т	s, г/т	V, %
	360/84	360/85	360/86	360/87	360/87,5	376/165	376/166	376/170	376/171	376/172	376/173			
Li	46,45	41,57	42,37	34,62	38,12	52,78	44,05	29,54	27,76	27,15	25,60	37,67	7,53	19,99
Be	0,99	0,94	0,91	0,59	1,09	1,02	1,04	0,72	0,63	0,50	0,53	0,73	0,23	31,55
Sc	25,07	24,09	23,46	22,17	22,18	28,82	28,69	27,90	27,27	26,83	26,82	25,31	1,90	7,50
Ga	26,08	25,04	25,83	23,04	21,60	27,55	26,37	28,09	28,15	27,74	27,30	25,62	1,68	6,57
Sr	76,88	102,10	99,30	102,10	100,60	126,60	131,20	119,10	123,50	130,90	131,40	90,37	28,94	32,02
Y	33,41	25,34	26,74	23,87	25,12	38,19	36,70	27,15	25,10	23,37	23,15	27,47	5,00	18,20
Zr	175,95	120,70	112,10	119,20	107,60	206,00	234,70	188,80	131,20	167,00	113,30	150,68	35,70	23,70
Nb	11,18	8,30	7,26	7,91	7,14	13,28	12,53	9,67	9,09	8,40	7,99	9,34	1,84	19,65
La	13,10	10,28	11,15	11,17	10,44	14,89	14,19	11,00	9,51	8,79	8,50	11,28	2,23	19,81
Ce	30,96	23,53	25,19	24,36	23,84	90,12	87,02	65,29	56,86	54,14	49,59	36,47	20,32	55,72
Pr	4,38	3,20	3,54	3,37	3,30	4,65	4,51	3,47	3,04	2,84	2,69	3,59	0,71	19,79
Nd	20,16	15,51	16,05	15,28	15,24	22,21	21,42	16,09	14,32	13,43	12,87	16,67	3,28	19,65
Sm	5,46	4,12	4,44	3,87	4,01	5,92	5,64	4,33	3,89	3,66	3,56	4,43	0,83	18,68
Eu	1,52	1,33	1,36	1,24	1,33	1,78	1,73	1,16	1,10	1,08	1,03	1,33	0,23	17,03
Gd	6,56	4,83	5,06	4,70	4,87	7,12	6,87	5,11	4,70	4,44	4,27	5,34	0,98	18,36
Tb	1,08	0,84	0,86	0,78	0,79	1,16	1,14	0,84	0,78	0,74	0,71	0,89	0,15	17,42
Dy	6,90	5,43	5,36	4,89	5,10	7,42	7,24	5,34	5,03	4,76	4,63	5,71	1,00	17,47
Ho	1,44	1,13	1,10	0,99	1,06	1,67	1,63	1,18	1,11	1,07	1,00	1,21	0,23	18,70
Er	4,08	3,27	3,13	3,00	3,10	4,42	4,33	3,14	3,00	2,84	2,76	3,39	0,60	17,63
Tm	0,58	0,46	0,44	0,41	0,43	0,65	0,62	0,44	0,42	0,41	0,40	0,49	0,09	18,54
Yb	3,75	2,89	2,90	2,67	2,76	3,94	3,82	2,75	2,57	2,46	2,47	3,03	0,55	18,19
Lu	0,55	0,46	0,41	0,39	0,41	0,55	0,55	0,38	0,36	0,34	0,34	0,44	0,08	17,98
Hf	4,47	3,13	3,28	3,18	3,17	4,80	5,36	4,37	3,18	3,74	2,85	3,76	0,81	21,56
Ta	0,73	0,60	0,61	0,69	0,63	1,38	1,38	1,07	1,01	0,97	0,95	0,81	0,22	27,74
Th	2,35	1,70	1,80	1,71	1,73	2,55	2,51	1,84	1,74	1,63	1,53	1,97	0,34	17,51
U	0,49	0,36	0,36	0,36	0,36	0,51	0,51	0,36	0,37	0,35	0,34	0,43	0,14	33,14

аккумулируется в ванадистых шлаках [2], поэтому 3308 т  $Sc_2O_3$ , вероятно, будут утрачены. Плагноклаз, биотит и хлорит малопригодны для извлечения скандия из-за его низкого содержания. В качестве перспективного источника скандия может рассматриваться только пироксен-амфиболовый концентрат, который нужно будет выделять из силикатных хвостов обогащения руд.

Оцененные в первом приближении и без учета каких-либо технологических потерь извлекаемые ресурсы  $Sc_2O_3$  рудной залежи Пудожгорского месторождения, сосредоточенные в пироксен-амфиболовом концентрате ( $\approx 67,8$  Мт, содержание  $Sc_2O_3 \approx 125$  г/т), составляют  $\approx 8,4$  кт (8,44–8,46 кт, табл. 3, 4). Такое количество полезного компонента, согласно принятой схеме ранжирования [4, табл. 1], соответствует среднемасштабному

месторождению скандия и соизмеримо с прогнозными ресурсами этого металла на Гусевогорском титаномагнетитовом месторождении (5,1 кт Sc [5], или 7,8 кт  $Sc_2O_3$ ).

Сравнение общепризнанных перспективных источников скандия с пудожгорским пироксен-амфиболовым концентратом показывает, что среднее содержание  $Sc_2O_3$  в нем такое же, как в красных шлаках ( $Sc_2O_3 - 125$  г/т [8]), но меньше, чем в пироксеновых хвостах обогащения руд качканарского типа ( $Sc_2O_3 - 176$  г/т [2]). По содержанию урана и тория пироксен-амфиболовый концентрат (табл. 4) характеризуется как низко- или слаборадиоактивный.

Судя по результатам химического анализа и определенному на их основе количеству РМ (табл. 4), вовлекаемых вместе со скандием

## Исходные данные и результаты расчета среднего минерального состава руды, мас. %

Компонент	Средний химический состав руды и ее минералов													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO <sub>2</sub>	28,66	29,54	29,54	1,82	—	53,80	50,65	34,52	24,27	0,27	43,2	68,44	64,7	100
TiO <sub>2</sub>	8,82	9,09	9,09	19,30	51,08	0,50	0,37	2,27	0,63	—	—	—	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,63	9,93	9,93	1,93	—	2,26	3,82	12,41	16,34	—	36,7	19,35	18,4	—
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,27	15,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
FeO	23,93	24,67	38,83	73,63	47,35	15,03	24,6	30,24	37,9	0,34	—	—	—	—
MnO	0,28	0,29	0,10	0,12	1,51	0,15	0,06	—	—	—	—	—	—	—
MgO	2,96	3,05	3,05	1,07	—	12,64	8,24	4,90	6,25	—	—	—	—	—
CaO	4,72	4,87	4,87	0,16	—	15,27	9,87	—	0,10	49,45	20,1	—	—	—
K <sub>2</sub> O	0,97	1,00	1,00	—	—	0,05	0,46	8,93	0,16	—	—	—	16,9	—
Na <sub>2</sub> O	1,52	1,57	1,57	—	—	0,15	0,41	0,02	0,22	—	—	11,67	—	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	0,26	0,26	—	—	—	—	—	—	44,33	—	—	—	—
Результаты расчета минерального состава														
Содержание в руде				37,99	2,80	3,33	18,07	9,68	3,41	0,56	11,31	12,85	0	0

Примечания: **1–3** – составы руды: **1** – средний для 24 образцов (номера в табл. 1), по данным силикатного анализа [18, табл. 6.2–6.4]; **2** – нормализованный средний; **3** – расчетный; **4–14** – средние (n – число анализов) и нормативные составы минералов: **4** – титаномагнетит рудной залежи ([18, табл. 7.1], n = 124), **5** – ильменит (шлифы 360/80, 376/174, n = 6), **6** – клинопироксен (шлифы 275/85,8–90, 360/87,5, 376/174 [18, табл. 7.2, номер п/п – 12–17, 19, 20, 35–39], n = 13), **7** – амфибол (шлифы 275/79,8–86,8 [18, табл. 7.3], n = 23), **8** – биотит (шлифы 360/78,7, 80, 84 и 376/174, n = 26), **9** – хлорит (шлифы 360/80, 84 и 376/174, n = 6), **10** – апатит (шлифы 275/81,8–86,8 [18, табл. 7.5], n = 6), **11** – анортит, **12** – альбит, **13** – калиевый полевой шпат, **14** – кварц.

Таблица 3

## Распределение оксида скандия в минералах рудной залежи

Минералы	Масса минерала, т	Содержание Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , г/т	Масса Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , т
Титаномагнетит + ильменит	129 177 443	25,61	3308
Биотит	30 655 495	10,25	314
Хлорит	10 799 095	10,25	111
Плагиоклаз	76 512 062	1,53	117
Апатит	1 773 458	0	0
Клинопироксен + амфибол	67 771 446	124,59	8444
Сумма (руда)	316 689 000	38,82	12 294

в процессы переработки пироксен-амфиболового концентрата, интересными в промышленном отношении могут быть ресурсы лития, галлия, циркония и TR.

Для первичной оценки качества (состава) сопутствующих TR использовано соотношение групп дефицитных (Nd, Tb, Dy, Y), потенциально дефицитных (Eu, Er) и избыточных (Ce, Ho, Tm, Yb, Lu) компонентов, выделенных с учетом их прогнозируемого производства и потребления [17].

График (рис. 2) в координатах  $D_{\text{деф}}/K_{\text{пер}}$ , где  $K_{\text{пер}}$  – коэффициент перспективности, а  $D_{\text{деф}}$  – доля дефицитных и потенциально дефицитных

компонентов в составе TR, наглядно демонстрирует, что по этим показателям пироксен-амфиболовый концентрат уступает карельским пиральспитовым гранатам, но превосходит такие общепризнанные источники РМ, как красные шламы и фосфогипс.

Ранее отмечалось [18], что в пудожгорских рудах железо – третьестепенный в стоимостном отношении полезный компонент, а титан и ванадий – главные. Расчет, выполненный с использованием цен РМ в июле 2021 г. (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 16,31 долл./кг; Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2050,70 долл./кг [20; 21]), показывает, что стоимости содержащегося в рудной залежи пентоксида ванадия ( $\approx 22,2$  млрд долл.) и оксида

Содержание и прогнозные ресурсы РМ в пироксен-амфиболовом концентрате

Компонент	Содержание, г/т				Среднее	Прогнозные ресурсы РМ, кт
	Номер образца (номер скважины / глубина отбора, м)					
	360/83	376/166	376/170	376/172		
Li <sub>2</sub> O	72,94	94,6	75,44	80,57	80,89	5,48
BeO	4,44	4,25	3,55	4,5	4,18	0,28
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	120,54	98,44	136,29	144,13	124,85	8,46
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,68	42,92	37,37	34,91	36,97	2,51
SrO	18,99	30,39	37,12	30,45	29,24	1,98
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61,41	70,23	76,16	65,51	68,33	4,63
ZrO <sub>2</sub>	145,64	261,82	199,41	186,71	198,39	13,45
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18,32	13,26	7,31	9,9	12,2	0,83
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,53	23,07	30,46	14,73	19,7	1,33
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,11	53,08	67,02	37,01	45,81	3,1
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1	7,17	8,93	5,1	6,33	0,43
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,13	32,76	38,67	25,91	29,12	1,97
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,53	9,28	10,48	7,9	8,55	0,58
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,49	2,74	2,48	1,76	2,12	0,14
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,45	10,93	12,16	10,04	10,39	0,7
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,47	2,01	2,15	1,84	1,87	0,13
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,32	12,49	13,59	11,76	12,04	0,82
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,26	2,55	2,76	2,49	2,51	0,17
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,7	7,41	7,76	6,88	7,19	0,49
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,99	1,05	1,07	0,97	1,02	0,07
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,18	6,62	6,88	6,04	6,43	0,44
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,85	0,92	0,94	0,9	0,9	0,06
HfO <sub>2</sub>	4,29	6,05	4,52	3,92	4,69	0,32
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,82	0,72	0,38	0,5	0,6	0,04
ThO <sub>2</sub>	2,08	3,29	3,73	3,45	3,14	0,21
UO <sub>2</sub>	0,37	0,62	0,58	0,59	0,54	0,04
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	166,52	242,31	281,51	198,84	222,31	15,06
<sup>Y</sup> TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	106,65	126,23	136,43	116,09	121,35	8,23
<sup>Y</sup> TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	64,05	52,09	48,46	58,38	54,59	54,65

скандия в пироксен-амфиболовом концентрате ( $\approx 17,4$  млрд долл.) – однопорядковые величины. Это позволяет рассматривать скандий в числе главных полезных компонентов комплексных титаномагнетитовых руд.

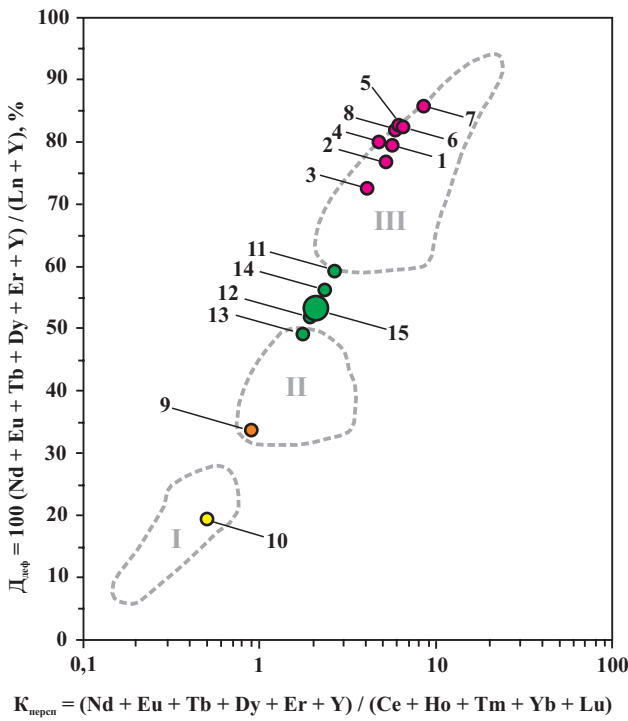
**Выводы.** В рудной залежи Пудожгорского титаномагнетитового месторождения (316,689 Мт руды, среднее содержание Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 38,82 г/т) прогнозные валовые ресурсы Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\approx 12,3$  кт.

Прогнозные извлекаемые ресурсы Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, оцененные без учета каких-либо технологических потерь, составляют  $\approx 8,4$  кт и сосредоточены в пироксен-амфиболовом концентрате (мас-

са  $\approx 67,77$  Мт, содержание Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\approx 125$  г/т), который может быть выделен из силикатных хвостов обогащения руд (масса  $\approx 187,52$  Мт).

Извлекаемые ресурсы скандия соответствуют рангу среднемасштабного месторождения этого металла.

Прогнозные ресурсы РМ, сопутствующих скандию в пироксен-амфиболовом концентрате, составляют, кт: Li<sub>2</sub>O – 5,5; ZrO<sub>2</sub>  $\approx 13,5$ ; TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\approx 15,1$ , из них <sup>Y</sup>TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\approx 8,2$ . Ответ на вопрос о возможности и экономической целесообразности их добычи требует дополнительных разносторонних, в частности технологических, исследований.



**Рис. 2. Оценка качества и сравнение различных источников ТР с учетом соотношения в их составе групп дефицитных и избыточных компонентов**

Арабскими цифрами пронумерованы фигуративные точки показателей состава ТР: 1–8 – в карельских пиральспитовых гранатах [14]; 9 – в красном шламе (содержание ТР по [8]); 10 – в фосфогипсе (содержание ТР по [15]); 11–15 – в пробах пудожгорского пироксен-амфиболового концентрата (содержание ТР по табл. 4): 11 – пр. 360-83, 12 – пр. 360-76, 13 – пр. 376-170, 14 – пр. 376-172, 15 – среднее значение. Римскими цифрами обозначены поля перспективности рудных объектов в зависимости от состава ТР: I – неперспективные, II – перспективные, III – высокоперспективные (по [17])

На примере Пудожгорского месторождения показано, что комплексные титаномагнетитовые магматогенные руды дифференцированных интрузивов людиковийской габбро-диабазовой формации являются перспективным источником скандия – стратегически важного критического металла.

Соразмерный редкометалльный ресурсный потенциал предполагается у аналогичного Пудожгорскому Койкарского месторождения титаномагнетитовых руд. Промышленное освоение уже только этих двух объектов может положить начало созданию МСБ скандия на территории РК, географо-экономические условия которой вполне приемлемы для развития горнодобывающей и металлургической промышленности.

Результаты выполненных исследований являются дополнительным аргументом необходимости проведения надлежащих геологоразведочных мероприятий по доизучению карельских титаномагнетитовых объектов с подсчетом и утверждением запасов как главных, так и сопутствующих полезных компонентов.

Научно-исследовательские работы выполнены в рамках раздела «Металлогения и рудно-сырьевой потенциал критических металлов докембрия Республики Карелия» темы № 210 ИГ КарНЦ РАН (№ гос. рег. 121040600173-1).

1. Борисенко Л. Ф., Делицын Л. М., Полубабкин В. А., Усков Е. Д. Комплексное использование титаномагнетитовых руд. – М.: Геоинформмарк. 1997. – 65 с.

2. Борисенко Л. Ф., Еремин Н. Я., Усков Е. Д. Роль скандия в повышении комплексного использования титано-

номагнетитовых руд // Горная промышленность. – 1997. – № 1. – С. 15–20.

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

4. Быховский Л. З., Потанин С. Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений // Минеральное сырье. Серия геол.-экономическая. – 2009. – № 28. – 157 с.

5. Быховский Л. З. Редкоземельное и скандиевое сырье России / Л. З. Быховский, С. Д. Потанин, Е. И. Котельников, С. И. Ануфриева, В. В. Архангельская, Л. В. Игровская, Е. Г. Лихникевич, Л. В. Спорыхина // Минеральное сырье. – 2016. – № 31. – 217 с.

6. Григорьев Н. А. Распределение скандия в верхней части континентальной коры // Литосфера, 2011. – № 1. – С. 115–125.

7. Иванков С. И. Современные экологически малонапряженные технологии переработки различных типов титаномагнетитовых руд / С. И. Иванков, Л. З. Быховский, Л. П. Тигунов, Н. В. Петрова, Н. Ю. Стенин // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. Обзорная информация. Вып. 1. – М.: ВИНТИ, 2011. – 105 с.

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

9. Методические рекомендации по перспективной оценке различных типов скандийсодержащего сырья / Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов. – М.: ИМГРЭ, 1991. – 92 с.

10. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Ниобиевые, танталовые руды и редкоземельные элементы. – М., 2007. – 42 с.

11. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Книга I: Горючие полезные ископаемые. Металлические полезные ископаемые / В. П. Михайлов, А. Г. Леонтьев, Ю. Б. Голованов и др. – Петрозаводск: Изд-во Карелия, 2005. – 280 с.

12. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году: государственный доклад / С. А. Аксенов, П. Н. Мельников, Я. В. Алексеев и др. — М.: 2020. — 494 с.
13. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 16 января 1996 г. № 50-р «О перечне основных видов стратегического минерального сырья» [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/9015641> (дата обращения: 19.09.2018).
14. Ручьев А. М. Карельский гранат — перспективный источник скандия и редкоземельных металлов // Труды КарНЦ РАН. 2017. — № 11. — С. 30–42. DOI: 10.17076/geo621
15. 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: Материалы Всероссийской конференции по редкоземельным материалам «РЗМ-2013», 20–21 ноября 2013 г. — Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. — С. 12–20.
16. Светов С. А. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрических мафитовых комплексов / С. А. Светов, А. В. Степанова, С. Ю. Чаженина, Е. Н. Светова, З. П. Рыбникова, А. И. Михайлова, А. С. Парамонов, В. Л. Утицына, М. В. Эхова, В. С. Колодей // Труды КарНЦ РАН. — 2015. — № 7. — С. 54–73. DOI: 10.17076/geo140
17. Середин В. В. Новый метод первичной оценки перспективности редкоземельных руд // Геология рудных месторождений. — 2010. — Т. 52. — № 5. — С. 475–480.
18. Трофимов Н. Н., Голубев А. И. Пудожгорское благороднометалльное титаномагнетитовое месторождение. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. — 123 с.
19. Чудненко К. В. Петрологический инструмент для вычисления реального минерального состава горной породы (программа MC) / К. В. Чудненко, О. В. Авченко, А. С. Вах, А. К. Чудненко // Геоинформатика. — 2014. — № 2. — С. 44–54.
20. Vanadium prices daily updated [Электронный ресурс] // Evек GmbH: Price & Market: [сайт]. — URL: <https://vanadium-kaufen.com/en/> (дата обращения: 21.11.2021).
21. Scandium prices daily updated [Электронный ресурс] // Evек GmbH: Price & Market: [сайт]. — URL: <https://buy-scandium.com> (дата обращения: 21.11.2021).
1. Borisenko L. F., Delitsyn L. M., Polubabkin V. A., Uskov E. D. Kompleksnoe ispol'zovanie titanomagnetitovykh rud [Complex use of titanomagnetite ores]. Moscow, Geoinform-mark, 1997, 65 p.
2. 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]. *Russian Mining Industry*, 1997, no. 1, pp. 15–20. (In Russian).
3. Bortnikov N. S., Volkov A. V., Galyamov A. L., Vikent'ev I. V., Aristov V. V., Lalomov A. V., Murashov K. Yu. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state of the art and outlook. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 97–119. (In Russian).
4. Bykhovskiy L. Z., Potanin S. D. Geologo-promyshlennye tipy redkometal'nykh mestorozhdeniy [Geological and industrial types of rare metal deposits]. *Mineral'noe syr'e. Seriya geologo-ekonomicheskaya*, 2009, no. 28, 157 p. (In Russian).
5. Bykhovskiy L. Z., Potanin S. D., Kotel'nikov E. I., Anufrieva S. I., Arkhangel'skaya V. V., Igrevskaya L. V., Likhnikovich E. G., Sporykhina L. V. Redkozemel'noe i skandievое syr'e Rossii [Rare earth and scandium raw materials of Russia]. *Mineral'noe syr'e*, 2016, no. 31, 217 p. (In Russian).
6. Grigor'ev N. A. Raspredelenie skandiya v verkhney chasti kontinental'noy kory [Distribution of scandium in the upper part of the continental crust]. *Litosfera*, 2011, no. 1, pp. 115–125. (In Russian).
7. Ivankov S. I., Byhovskiy L. Z., Tigunov L. P., Petrova N. V., Stenin N. Yu. Sovremennye ekologicheski malonapryazhennyye tekhnologii pererabotki razlichnykh tipov titanomagnetitovykh rud [Scientific and technical aspects of environmental protection. Overview information]. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchey sredy. Obzornaya informatsiya. Vyp. 1*. Moscow, 2011, 105 p. (In Russian).
8. Kashcheev I. D., Zemlyanoy K. G., Doronin A. V., Kozlovskikh E. Yu. Developing refractory concretes of aluminosilicate- and alumina-based compositions for high-temperature equipment in ferrous metallurgy. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2014, no. 4, pp. 6–12. (In Russian).
9. Metodicheskie rekomendatsii po perspektivnoy otsenke razlichnykh tipov skandiysoderzhashchego syr'ya [Methodological recommendations for the prospective evaluation of various types of scandium-containing raw materials]. Moscow, 1991, 92 p.
10. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu Klassifikatsii zapasov mestorozhdeniy i prognoznykh resursov tverdykh poleznykh iskopaemykh. Niobievye, tantalovyie rudy i redkozemel'nye element [Methodical recommendation on the application of the Classification of deposits reserves and inferred resources of solid minerals. Niobium, tantalum ores, and rare-earth elements]. Moscow, 2007, 42 p.
11. Mikhaylov V. P., Leont'ev A. G., Golovanov Yu. B. et al. Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya. Kniga I: Goryuchie poleznye iskopaemye. Metallicheskie poleznye iskopaemye [Mineral resources of the Republic of Karelia. Book I. Combustible minerals. Metallic minerals]. Petrozavodsk: Izd-vo Kareliya, 2005, 280 p.
12. Aksenov S. A., Mel'nikov P. N., Alekseev Ya. V. et al. O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2019 godu: gosudarstvennyy doklad [On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2019: state report]. Moscow, 2020, 494 p.
13. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 16 yanvarya 1996 g. № 50-r «O perechne osnovnykh vidov strategicheskogo mineral'nogo syr'ya» [Decree of the Government of the Russian Federation no. 50-p, dated January 16, 1996 «On the list of the main types of strategic mineral raw materials»] [Elektronnyy resurs]. *Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tekhnicheskikh dokumentov: [sayt]*, available at: <http://docs.cntd.ru/document/9015641> (accessed 19 September 2018). (In Russian).
14. Ruch'ev A. M. Karelian garnet as a promising source of scandium and rare-earth metals. *Tруды КарНЦ РАН*, 2017, no. 11, pp. 30–42. DOI: 10.17076/geo621. (In Russian).
15. 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: Materialy Vserossiyskoy konferentsii po redkozemel'nym materialam «RZM-2013», 20–21 noyabrya 2013 g.* Seversk, 2013, pp. 12–20. (In Russian).
16. Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Rybnikova Z. P., Mikhaylova A. I., Paramonov A. S., Utitsyna V. L., Ekhova M. V., Kolodey V. S.

Precision geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of rock and mineral composition: the method and accuracy estimation in the case study of Early Precambrian mafic complexes. *Trudy KarNTs RAN*, 2015, no. 7, pp. 54–73. DOI: 10.17076/geo140 (In Russian).

17. Seredin V. V. Novyy metod pervichnoy otsenki perspektivnosti redkozemel'nykh rud [A new method for primary evaluation of the potential of rare earth element ores]. *Geology of Ore Deposits*, 2010, vol. 52, no. 5, pp. 475–480. (In Russian).

18. Trofimov N. N., Golubev A. I. Pudozhgorskoe blagorodnometall'noe titanomagnetitovoe mestorozhdenie [Pudozh-

gorskoe noble-metal titanite-magnetite deposit]. Petrozavodsk, 2008, 123 p.

19. Chudnenko K. V., Avchenko O. V., Vakh A. S., Chudnenko A. K. Petrological tool to calculate real mineral composition of the rock (MC program). *Geoinformatika*, 2014, no. 2, pp. 44–54. (In Russian).

20. Vanadium prices daily updated. *Evek GmbH: Price & Market: [sayt]*, available at: <https://vanadium-kaufen.com/en/> (accessed 21 November 2021).

21. Scandium prices daily updated. *Evek GmbH: Price & Market: [sayt]*, available at: <https://buy-scandium.com> (accessed 21 November 2021).

---

*Ручьев Андрей Михайлович* – ст. науч. сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН (ИГ КарНЦ РАН). Пушкинская ул., 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910. <ruchyov@krc.karelia.ru>

*Ruch'ev Andrey Mikhaylovich* – Senior Researcher, Institute of Geology of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG KarRC RAS). 11 Pushkinskaya ul., Petrozavodsk, the Republic of Karelia, Russia, 185910. <ruchyov@krc.karelia.ru>