



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-246-253

УДК 669.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО И ХИМИКО-МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВОВ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМТОР

М.Ю. Малькова, А.Н. Задиранов

Российский университет дружбы народов (РУДН)

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Проведены исследования гранулометрического, минерального и химического состава руды комплексного скандий-редкоземельно-ниобиевого месторождения Томтор. Показано, что основу руды составляют фосфаты, ниобаты и карбонаты. Основными идентифицированными минералами являются минералы крандаллитовой группы (горсейскит, гоэцит и флоренсит), пирохлор и монацит, кроме того, четко идентифицированы бемит, апатит и кварц. В группу прочих минералов входят сидерит, каолинит, рутил и некоторые другие минералы. Установлено, что исследуемая руда относится к минеральной разновидности пирохлор-монацит-крандаллитовых руд фосфатно-редкометалльного типа с преобладанием в ее составе минералов группы крандаллита (более 50%) и относительно невысоким содержанием пирохлора (~7%). По содержанию в пробе оксида ниобия Nb_2O_5 (~4%) руда по принятой классификации может быть отнесена ко второму сорту, т.е. к богатым ниобиевым рудам, содержащим от 3,5 до 9% Nb_2O_5 . Руда месторождения Томтор также богата по содержанию минералов редкоземельных элементов. На основании проведенных исследований сделан вывод о практической невозможности обогащения руды месторождения Томтор традиционными методами и экономической оправданности переработки руды комбинированными методами пиро- и гидрометаллургии.

Ключевые слова: руда месторождения Томтор, гранулометрический состав, минеральный состав, редкоземельные металлы (РЗМ), ниобий

Введение

Известно [1–3], что масштабы производства и потребления редкоземельных металлов (РЗМ) в мире за последние 20 лет увеличились в 3 раза. Анализ темпов современного развития промышленного производства показывает, что в ближайшие 5–10 лет потребность в редкоземельных металлах существенно вырастет. В связи с этим важнейшим направлением научных исследований представляется изучение действующих и новых перспективных месторождений руд РЗМ с целью решения задачи организации их высокоэффективной промышленной переработки и наиболее полного извлечения ценных металлов.

Одним из наиболее перспективных месторождений руд РЗМ на территории Российской Федерации является Томторское комплексное скандий-редкоземельно-ниобиевое месторождение, расположенное на северо-западе Республики Саха

(Якутия), в экономически не освоенном районе. Практическая значимость руд Томтора определяется колоссальными запасами и уникальными концентрациями ниобия, иттрия, скандия и тербия. Запасы месторождения оцениваются в 154 млн т руды. По запасам и концентрациям РЗМ оно превышает все известные мировые аналоги и является уникальным: средняя массовая доля оксидов РЗМ достигает 8–12%, в том числе 0,5% наиболее ценного оксида иттрия (III) [4]. Также руды Томтора содержат большие концентрации ниобия (до 7%). Руды первоочередного к эксплуатации участка Буранный Томторского месторождения представлены высокими содержаниями ниобия, иттрия, скандия и относятся к классу комплексного полиметаллического сырья. Объем кондиционных руд участка Буранный, подсчитанный по бортовому содержанию Nb_2O_5 — 1%, составляет 42,7 млн т [5]. Содержание оксидов редкоземельных металлов в рудах месторождения Томтор в 2 раза выше, чем в наиболее богатом зарубежном месторождении Маунтен-Пасс в США, а содержание ниобия в 2,5–3 раза выше, чем в самом богатом месторождении Бразилии — Агаха, обеспечивающем более 80% мировой добычи ниобия [6; 7]. Проблемой освоения Томторского месторождения является то, что оно располагается в районе с суровыми климатическими условиями и неразвитой инфраструктурой.

Распределение РЗМ в рудах Томторского месторождения представлено на рис. 1 [8].

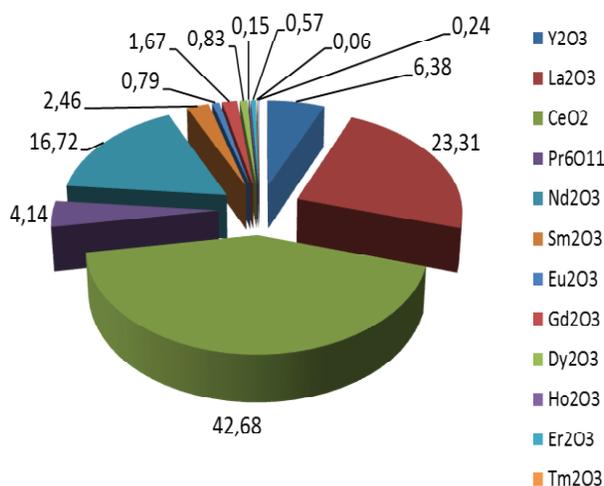


Рис. 1. Относительная массовая доля РЗМ в рудах Томторского месторождения
[Fig. 1. Relative mass fraction of REE in ores of Tomtor Deposit]

Целью данной работы являлось изучение технологической пробы руды месторождения Томтор для определения методов ее промышленной переработки. Для достижения поставленной цели исследования были выполнены следующие задачи:

- исследование гранулометрического, минерального и химического состава руды;
- изучение распределения целевых компонентов руды по классам крупности.

Методика проводимых исследований

Гранулометрический состав материала пробы определяли с помощью набора сит ЭКРОС (ТУ 3618-001-39436682—98).

Минеральный состав пробы исследуемой руды определяли методом электронной микроскопии (энергодисперсионный анализ).

Изучение вещественного состава пробы проводилось с использованием количественного химического анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП).

Результаты исследований

Технологическая проба руды месторождения Томтор представляет собой тонкодисперсный сыпучий материал темно-оливкового цвета крупностью $-2+0$ мм. Влажность руды составляет порядка 15%. Гранулометрический состав и содержание целевых компонентов по классам крупности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав и содержание целевых компонентов в руде месторождения Томтор по классам крупности
[Table 1. Particle size distribution and content of target components in Tomtor ore deposit by fraction sizes]

Размер фракции, мм [Fraction size, mm]	Доля фракции, % [Fraction percentage, %]	Плотность [Density]		Содержание, масс. % [Content, wt. %]			
		удельная, г/см ³ [Specific, g/cm ³]	объемная, г/см ³ [Bulk, g/cm ³]	Сумма РЗО*** [REO amount***]	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃
$-1+0^*$	100	3,42	1,55	19,8	4,00	22,5	0,062
$-1,0+0,5$	5,8	3,43	1,57	19,5	3,15	21,8	0,052
$-0,5+0,315$	14,8	3,54	1,58	20,4	3,37	19,0	0,060
$-0,315+0,1$	47,4	3,56	1,58	20,1	3,57	18,2	0,064
$-0,1+0,045$	6,8	3,55	1,62	21,6	4,00	20,8	0,078
$-0,045+0$	25,2	3,56	1,65	22,8	4,44	22,6	0,090
$-0,020+0^{**}$	20,2	—	—	22,5	4,65	22,1	0,092

* исходная проба руды (до отсева); ** выход фракции $-0,020+0$ мм определялся методом седиментационного анализа; *** РЗО — оксиды редкоземельных металлов [* the original ore sample (before sieving); ** output fraction $-0,020+0$ mm was determined by sedimentation analysis; *** REO — oxides of rare earth metals]

Как следует из представленных данных, гранулометрический состав руды в пробе характеризуется довольно высоким содержанием частиц тонких классов, при этом массовая доля частиц с размером менее 100 мкм составляет около 80%, менее 45 мкм — около 25% и менее 20 мкм — около 20%. Соотношения классов различной крупности, а также значения плотности являются типичными для предварительно дробленных по классу $-1+0$ мм пироклор-монацит-крандаллитовых руд.

Минеральный и химический составы исследуемой пробы представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Минеральный состав руды месторождения Томтор
[Table 2. Mineral composition of Tomtor ore deposits]

Наименование минерала [Name of mineral]	Содержание, % [Content, %]
Крандаллит [Crandallite] $\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	—
Горсейксит [Gorceixite] $\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$	25
Гояцит [Goyazite] $\text{SrAl}_3(\text{OH})_4(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)$	20
Флоренсит [Florencite] $(\text{Ce, La, Nd})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	8
Пирохлор [Pyrochlore] $(\text{Na, Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH, F})$	7
Бемит [Boehmite] AlOOH	4
Апатит [Apatite] $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F, Cl, OH})$	3
Монацит [Monazite] $(\text{Ce, La, Nd, Ca})(\text{PO}_4)$	13
Кварц [Quartz] SiO_2	1
Прочие (сидерит, каолинит, рутил) [Other (siderite, kaolinite, rutile)]	19
Минералы крандаллитовой группы: горсейксит, гоаяцит, флоренсит [Minerals of crandallite groups: gorceixite, goyazite, florencite]	53

Таблица 3

Химический состав руды месторождения Томтор
[Table 3. Chemical composition of Tomtor ore deposits]

№ п/п	Элемент (оксид) [Element (oxide)]	Содержание [Content], %	№ п/п	Элемент (оксид) [Element (oxide)]	Содержание [Content], %
1	Ag	<0,01	33	Nb_2O_5	4,0
2	Al_2O_3	14,4	34	Nd_2O_3	2,5
3	As	0,37	35	Ni	0,007
4	Au	<0,003	36	P_2O_5	22,5
5	B	0,19	37	Pb	0,25
6	BaO	2,9	38	Pd	<0,005
7	Be	<0,001	39	Pr_6O_{11}	0,62
8	CaO	8,5	40	Pt	<0,005
9	Cd	0,004	41	Re	<0,005
10	CeO_2	9,3	42	Rh	<0,003
11	Co	<0,001	43	Ru	<0,0001
12	Cr	0,06	44	S	2,3
13	CuO	0,14	45	Sb	<0,02
14	Dy_2O_3	0,19	46	Sc (Sc_2O_3)	0,04 (0,061)
15	Er_2O_3	0,17	47	SrO	3,7
16	EuO	0,12	48	SiO_2	1,9
17	Fe	3,6	49	Sm_2O_3	0,39
18	Ga	<0,05	50	Sn	<0,01
19	Gd_2O_3	0,32	51	Ta_2O_5	0,08
20	Hf	<0,002	52	Tb_4O_7	0,03
21	Hg	<0,007	53	Te	<0,01
22	Ho_2O_3	0,04	54	ThO_2	0,14

№ п/п	Элемент (оксид) [Element (oxide)]	Содержание [Content], %	№ п/п	Элемент (оксид) [Element (oxide)]	Содержание [Content], %
23	J	<0,03	55	TiO ₂	6,7
24	Jn	<0,02	56	Tm ₂ O ₃	0,01
25	Jr	<0,01	57	U	0,005
26	La ₂ O ₃	4,8	58	V ₂ O ₅	2,1
27	Li	0,0005	59	W	<0,02
28	Lu ₂ O ₃	0,003	60	Y ₂ O ₃	1,16
29	MgO	0,62	61	Yb ₂ O ₃	0,096
30	MnO ₂	0,9	62	ZnO	0,42
31	Mo	<0,007	63	ZrO ₂	0,11
32	Na	0,58	64	P ₂ O ₅	19,75

Представленные в табл. 2 и 3 результаты позволяют сделать следующие заключения о вещественном составе руды месторождения Томтор.

Основу руды в пробе составляют фосфаты, ниобаты и карбонаты. Основными идентифицированными минералами являются минералы крандаллитовой группы (горсейскит, гоацит и флоренсит), пироклор и монацит, кроме того, четко идентифицированы бемит, апатит и кварц. В группу прочих минералов входят сидерит, каолинит, рутил и некоторые другие минералы.

В целом, исследуемая руда относится к минеральной разновидности пироклор-монацит-крандаллитовых руд фосфатно-редкометалльного типа с преобладанием в ее составе минералов группы крандаллита (более 50%) и относительно невысоким содержанием пироклора (~7%). По содержанию в пробе Nb₂O₅ (~4%) руда по принятой классификации может быть отнесена ко второму сорту, т.е. к богатым ниобиевым рудам, содержащим от 3,5 до 9% Nb₂O₅.

Выводы

Руда месторождения Томтор является тонкодисперсным материалом, частицы которого представлены полиминеральными агрегатами (флоккулами) из микрокристаллов размером в доли микрометра, сформированными в основном полиморфными модификациями фосфатов с общей формулой (Sr,Ba,Ca)Al₃(PO₄)_x(OH)_y, в кристаллической решетке которых атомы Sr, Ba и Ca частично замещаются атомами редкоземельных элементов.

По содержанию промышленно-ценных и породообразующих элементов руда не является аномальной. Руда принадлежит к пироклор-монацит-крандаллитовой разновидности фосфатно-редкометалльного типа с относительно невысоким содержанием ниобиевых минералов и богата по содержанию минералов редкоземельных элементов. В исходной и измельченной пробах руды практически отсутствуют обособленные (раскрытые) частицы отдельных минералов ценных элементов. Проба руды характеризуется однородностью физико-механических свойств рудного материала при высокой гетерогенности минерального состава.

Учитывая высокую комплексность исследуемой руды и тонкую дисперсность минеральных образований, можно сделать вывод о практической невозможности обогащения руды месторождения Томтор традиционными методами. Однако значительное содержание оксидов редкоземельных элементов (~20%) и относительно высокое содержание ниобия (~4% Nb₂O₅) позволяет считать перспективной и экономически оправданной переработку руды комбинированными методами пиро- и гидрометаллургии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Петухов М.А.* Исследование процесса хлорирования танталито-колумбитового концентрата и создание технологии совместной переработки танталито-колумбитового и лопаритового концентратов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2010. 26 с.
- [2] *Наумов А.В.* Обзор мирового рынка редкоземельных элементов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2008. № 1. С. 22—31.
- [3] *Чуб А.В.* Гибкие многоцелевые технологии глубокой переработки редкоэлементного сырья хлорным методом: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Соликамск, 1999. 16 с.
- [4] *Полякова М.А.* Элементный состав редкоземельных руд и его влияние на оценку месторождений: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: ИМГРЭ, 2002. 32 с.
- [5] *Архангельская В.В., Лагонский Н.Н., Усова Т.Ю., Чистов Л.Б.* Руды редкоземельных металлов России // *Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая*. 2006. № 19.
- [6] *Еханин А.Г., Шибистов Б.В., Курбатов И.И.* Ресурсная минерально-сырьевая база цветных и редких металлов Красноярского края // *Природные ресурсы Красноярского края*. 2010. № 8. С. 82—89.
- [7] *Малькова М.Ю., Задиранов А.Н.* Перспективы создания отечественной редкоземельной промышленности // *Сб. докладов VIII Международной научно-практической конференции РУДН «Инженерные системы — 2015»*. 2015. С. 500—505.
- [8] *Литвинова Т.Е.* Получение соединений индивидуальных РЗМ и попутной продукции при переработке низкокачественного редкометалльного сырья: дисс. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 318 с.

© Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 18 декабря 2017

Дата принятия к печати: 10 апреля 2018

Для цитирования:

Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Исследование гранулометрического и химико-минерального составов руды месторождения Томтор // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19. № 2. С. 246—253. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-246-253

Сведения об авторах:

Малькова Марианна Юрьевна — доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* металлургия черных и цветных металлов, нанотехнологии в металлургии, материаловедение, переработка техногенных отходов. *Контактная информация:* e-mail: marianna300@yandex.ru

Задиранов Александр Никитич — доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* металлургия черных и цветных металлов, нанотехнологии в металлургии, материаловедение, переработка техногенных отходов, литейное производство. Контактная информация: e-mail: zadiranov@mail.ru

STUDY OF GRANULOMETRIC AND CHEMICAL-MINERAL COMPOSITIONS OF TOMTOR ORE DEPOSIT

M.Y. Malkova, A.N. Zadiranov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

Abstract. A study of the particle size distribution, mineral and chemical composition of the complex scandium-rare-earth-niobium Tomtor ore deposit has been conducted. It is shown that the basis of the ore is comprised of phosphates, carbonates and niobates. The main identified minerals are the minerals of crandallite group (gorceixite, goyazite and florencite), pyrochlore and monazite, in addition, clearly identified boehmite, apatite, and quartz. A group of other minerals includes siderite, kaolinite, rutile and some other minerals. It is established that the investigated ore belongs to a mineral variety of the pyrochlore-monazite-crandallite ores of phosphate-rare-metal type with a predominance of crandallite minerals (50%) and relatively low content of pyrochlore (~7%) in its composition. Based on the content of niobium oxide Nb_2O_5 (~4%) in a sample, the ore can be attributed to the second class according to the accepted classification, i.e. the rich niobium ores, containing from 3,5 to 9% Nb_2O_5 . Tomtor ore deposit is also rich in the mineral content of rare earth elements. On the basis of the conducted research the conclusion about practical impossibility of beneficiation of “Tomtor” ore deposits by traditional methods and economic feasibility of ore processing by the combined pyro — and hydrometallurgy methods is made.

Key words: Tomtor ore deposit, particle size distribution, mineral composition, rare earth metals (REM), niobium

REFERENCES

- [1] Petukhov M.A. Issledovanie processa hlorigirovaniya tantalito-kolumbitovogo koncentrata i sozdanie tehnologii sovmestnoj pererabotki tantalito-kolumbitovogo i loparitovogo koncentratov [A study of the chlorination process of tantalite-columbite concentrate and creation of technology of joint processing of tantalite-columbite and loparite concentrates]: Thesis abstract. ... Cand. Tech. Sc. Moscow, 2010. 26 p. (In Russ.)
- [2] Naumov A.V. Obzor mirovogo rynka redkozemel'nykh elementov [Global rare-earth elements market overview]. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya [Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy]*. 2008. No. 1. P. 22—31. (in Russ.)
- [3] Chub A.V. Gibkie mnogotsel'nyye tekhnologii glubokoi pererabotki redkoelementnogo syr'ya khlornym metodom [Flexible, multi-purpose technologies of deep processing of rare element raw materials by chlorine method]: thesis abstract. ... Cand. Tech. Sc. Solikamsk, 1999. 16 p. (In Russ.)
- [4] Polyakova M.A. Elementnyi sostav redkozemel'nykh rud i ego vliyanie na otsenku mestorozhdenii [Elemental composition of rare-earth ores and its influence on deposits allocation]: Thesis abstract. ... Cand. Geol. Min. Sc. Moscow: IMGRE Publ., 2002. 32 p. (In Russ.)

- [5] Arkhangel'skaya V.V., Lagonskii N.N., Usova T.Yu., Chistov L.B. Rudy redkozemel'nykh metallov Rossii [Ores of rare earth metals in Russia]. Mineral'noe syr'e. Seriya geologo-ekonomicheskaya [Mineral raw materials. Geological-economical series]. Moscow: VIMS Publ., 2006. No. 19. 72 p. (In Russ.)
- [6] Ekhanin A.G., Shibistov B.V., Kurbatov I.I. Resurnaya mineral'no-syr'evaya baza tsvetnykh i redkikh metallov Krasnoyarskogo kraia [Mineral resource basis of nonferrous and rare metals of Krasnoyarsk Krai]. *Prirodnye resursy Krasnoyarskogo kraia [Natural resources of Krasnoyarsk Krai]*. 2010. No. 8. P. 82–89. (in Russ.)
- [7] Mal'kova M.Yu., Zadiranov A.N. Perspektivy sozdaniya otechestvennoi redkozemel'noi promyshlennosti [Prospects for creation of domestic rare-earth industry]. Collection of reports of the VIII International Scientific and Practical Conference of RUDN "Engineering systems – 2015". Moscow: RUDN Publ., 2015. P. 500–505. (In Russ.)
- [8] Litvinova T.E. Poluchenie soedinenii individual'nykh RZM i poputnoi produktsii pri pererabotke nizkokachestvennogo redkometall'nogo syr'ya [Obtaining compounds of individual REM and associated products when processing low quality rare metal raw material]. Diss. ... Doct. Tech. Sc. Saint-Petersburg, 2014. 318 p. (in Russ.)

Article history:

Received: December 18, 2017

Accepted: April 10, 2018

For citation:

Malkova M.Yu., Zadiranov A.N. (2018). Study of granulometric and chemical-mineral compositions of Tomtor ore deposit. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 246–253. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-246-253

Bio Note:

Marianna Yu. Malkova — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, nanotechnology in metallurgy, materials science, recycling of industrial waste. *Contact information:* e-mail: marianna300@yandex.ru

Alexandr N. Zadiranov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, nanotechnology in metallurgy, materials science, recycling of industrial waste, foundry. *Contact information:* e-mail: zadiranov@mail.ru