

ПРОБЛЕМЫ ПРЯМОЙ ЩЕЛОЧНО-КИСЛОТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ РУД ТОМТОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Кузьмин В.И., Кузьмин Д.В., Энов О.А., Жижаев А.М., Бондаренко Г.В.

Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация.

olegepov998@gmail.com

Томторское редкометальное месторождение расположено на севере России в северо-западной части Республики Саха (Якутия). По составу руд и их запасам месторождение является уникальным сырьевым источником редкоземельных металлов (РЗМ), в частности – скандия и ниобия [1-3]. Ключевой особенностью руд Томторского место-

рождения является ультрадисперсность и сильная взаимная сросченность минеральных частиц [4-7], что делает неэффективным выделения монацитового и пирохлорового концентратов известными обогатительными методами. В то же время применение прямого вскрытия такого рода руд неизбежно влечет за собой значительный расход реагентов и зачастую делает экономически невозможной разработку месторождений руд даже при высоких содержаниях ценных элементов. В настоящее время апробирован ряд процессов прямой переработки томторских руд. По данным работы [8] применение растворов азотной кислоты показало низкую эффективность из-за низких показателей извлечения редкоземельных элементов, скандия и некоторых других элементов. Использование комбинированной схемы с использованием раствора серной кислоты так же отказалось неэффективным. Наиболее эффективно руды могут быть вскрыты щелочно-кислотным методом, когда на первой стадии монацит разлагают концентрированными растворами гидроксида натрия, а затем гидроксиды РЗМ растворяют в азотной или соляной кислоте.

Таблица 1 – Состав образца руды участка Буранный Томторского редкометального месторождения

№ п/п	Элемент, (оксид),	Содержание, % (масс), [1]
1	Σ РЗО	10,2
2	Nb_2O_5	6,7
3	TiO_2	5,0
4	V_2O_5	1,2
5	Al_2O_3	17,1
6	P_2O_5	16,0
7	Fe_2O_3	6,9
8	FeO	5,1
9	CaO	2,6
10	SrO	3,8
11	BaO	3,2
12	ThO_2	0,15
13	UO_3	0,01
14	SiO_2	3,8
15	S	0,2
16	F	0,5

Основные проблемы метода возникают на первой стадии – щелочного разложения монацита с удалением фосфора вместе с выщелачивающим раствором.

Другой проблемой щелочно-кислотной переработки томторских руд, которая упоминается в литературе [6], является значительные колебания степени извлечения РЗМ в кислый раствор после щелочного вскрытия.

Экспериментальная часть

При выполнении работы были использованы неорганические соли, кислоты и основания марки «х.ч.» и «ч.д.а». Исследования по щелочному вскрытию проводили на представительной пробе томторской руды с участка «Буранный». Состав руды представлен в таблице 1.

Щелочное выщелачивание осуществляли в реакторе из фторопласта, снабженного мешалкой, в обогреваемой шаровой мельнице из нержавеющей стали, а также стальном автоклаве, футерованном фторопластом. Пульпу после вскрытия фильтровали на обогреваемом фильтр-прессе при температуре 70-80°C для предотвращения выделения из раствора тринатрийфосфата. Осадок после отделения от маточного раствора промывали горячей водой. Затем, в за-

висимости от решаемой задачи, анализировали твердую и жидкую фазы.

Концентрацию элементов в водной фазе определяли атомно-абсорбционным (абсорбционный спектрометр Analyst 400 (Perkin Elmer), и масс-спектрометрическими методами (спектрометр ICP-MS 7500C (Agilent) с индуктивно-связанной плазмой), в твердой фазе - рентгено-флуоресцентным методом (спектрометр PANalytical Axios Advanced). Регистрацию рентгеновских дифрактограмм проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (Буревестник, Россия). Также были получены изображения поверхностных слоев остатков выщелачивания при помощи сканирующего электронного микроскопа ТМ-3000 (Hitachi, Япония), оборудованном энергодисперсионной системой анализа Quantax-70 (Bruker, Германия), электронных микроскопов S-5500 и SEM NV 1000 с системой микроанализа.

Результаты и обсуждения.

Для определения структуры и соотношения элементов в поверхностном

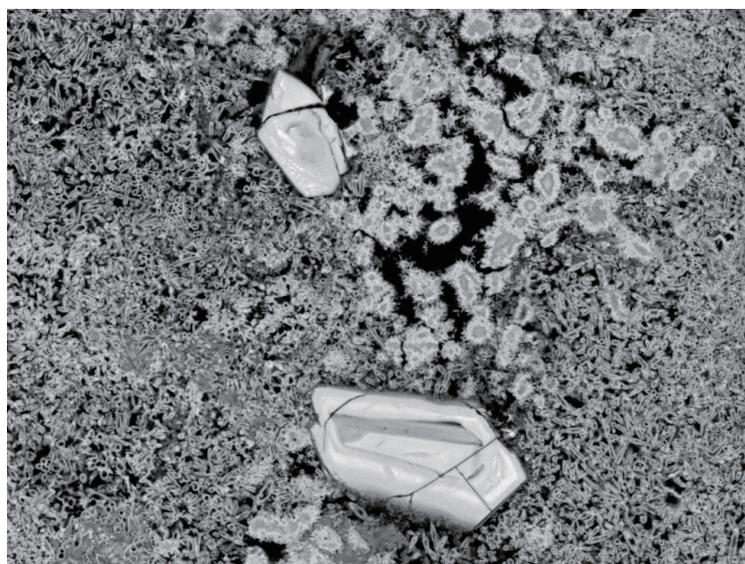


Рисунок 1. – СЭМ изображение образца неизмельченной томторской руды: серые, мелкие частицы – алюмофосфаты; светлая каемка на частицах – монацит; кристаллы, вкрапленные в алюмофосфатную массу – пироклор.

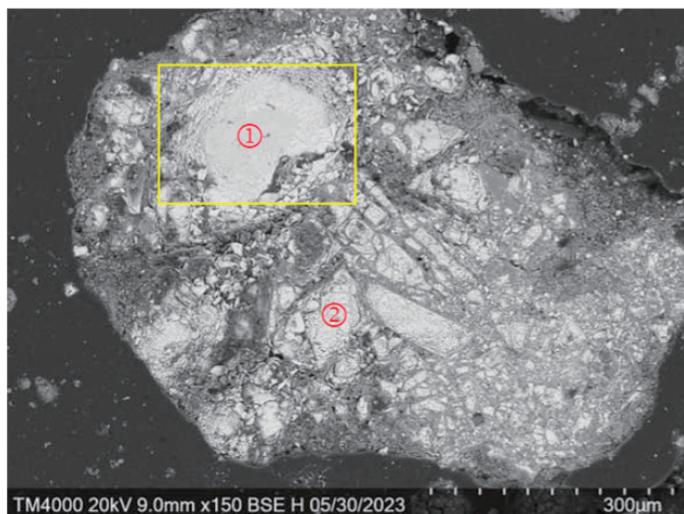


Рисунок 2. – СЭМ изображение образца неизмельченной томторской руды.

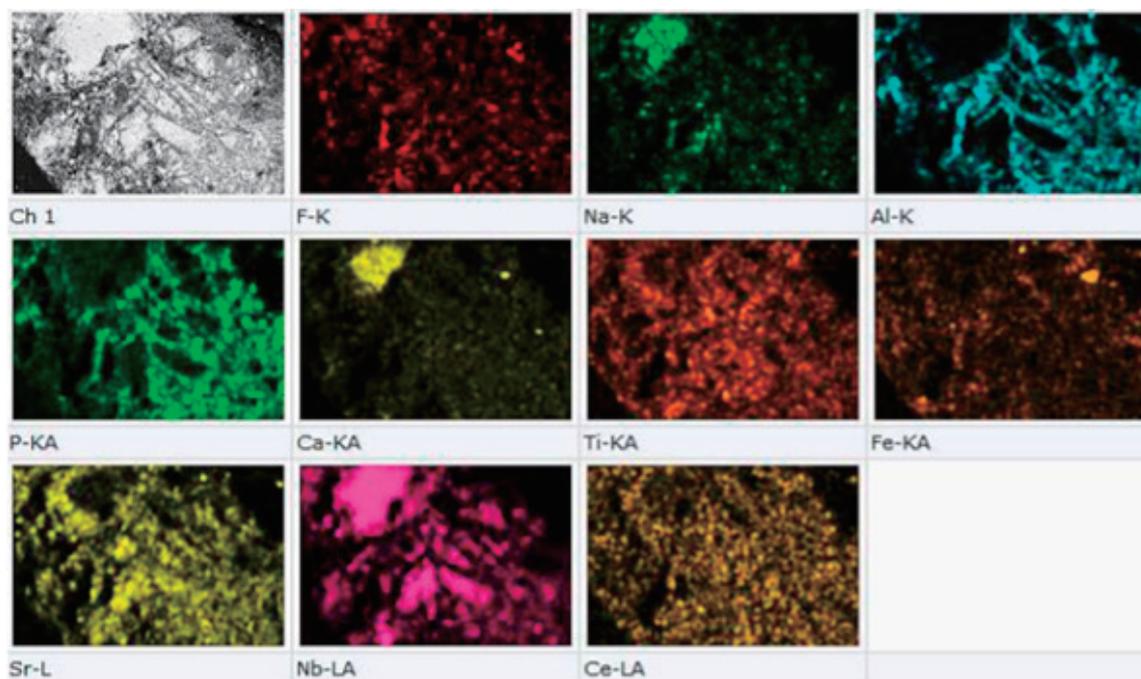


Рисунок 3 – Карты распределения элементов по области, определяемой рисунком 1.

слое образцов руды были получены изображения сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Редкоземельные металлы представлены в основном монацитом, частицы которого ультрадисперсны и срощены с алюмофосфатами (рис. 1).

Пирохлор представлен более крупными частицами, размер которых достигает 10-30 мкм. Для него характерны два типа частиц (рис. 2-6).

1. Частицы первого типа (рис. 5), связанные с кальцием и натрием – компактные массивные.

2. Частицы второго типа (рис 6), связанные со стронцием – луковичеобразные, имеют тонкую многослойную структуру. Такие частицы часто рассекаются прожилками алюмофосфатной фракции (рис.2, 6).



Рисунок 4 – СЭМ изображение фрагмента 2 рисунок 1. Кальций содержащее ядро (темно серое) и многослойная «скорлупа», содержащая стронций.

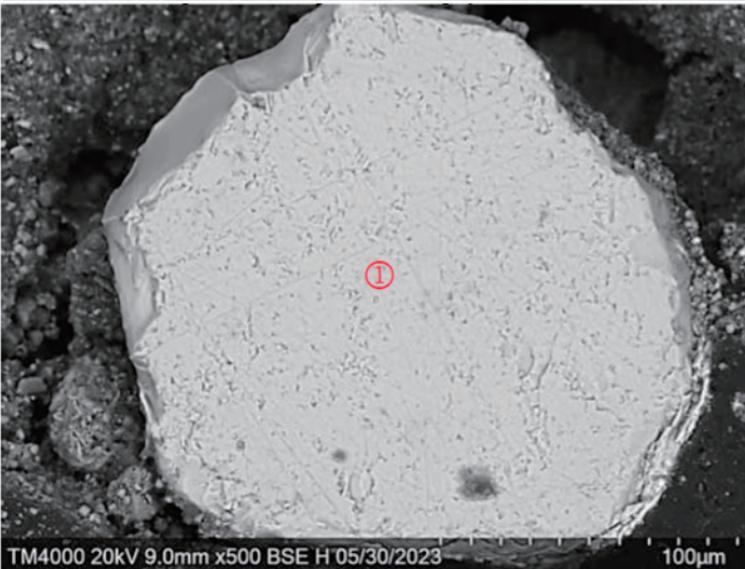


Рисунок 5 – СЭМ изображение фрагмента 1 рисунок 1. Компактная массивная частица, содержащая ниобий.

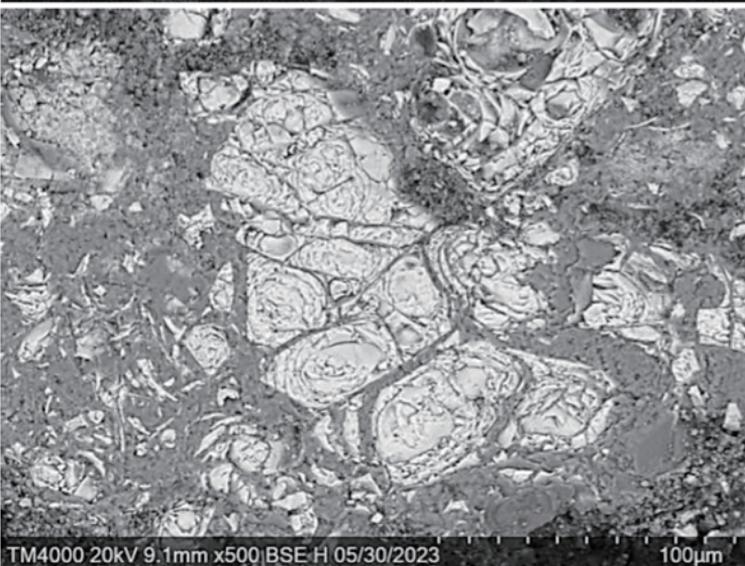
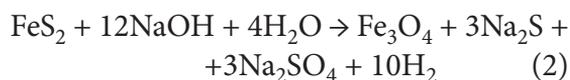
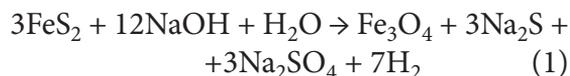


Рисунок 6 – СЭМ изображение частиц неизмельченной руды. Луковицеобразные частицы, содержащие ниобий, рассеченные прожилками алюмофосфатной фазы

Частицы первого и второго типов часто связаны в агрегаты – частицы первого типа располагаются в ядре, вокруг которых формируется скорлупа частиц второго типа. В частицах второго типа соотношение Nb/Ti составляет 10-15. В частицах первого типа – около 40. Данные СЭМ подтверждают, что руда действительно является ультрадисперсной и наблюдается крайне сильное взаимное прорастание минеральных частиц.

Проведено прямое щелочное вскрытие томторской руды 45% раствором гидроксида натрия при температуре кипения раствора (около 130°C) при отношении Т:Ж=1:4, время перемешивания пульпы – 2 часа. После выщелачивания пульпу фильтруют при температуре 80°C, осадок отмывают от тринатрийфосфата горячим 30% раствором ги-

дроксида натрия, а затем водой. При охлаждении раствора кристаллизуется гидратированный тринатрийфосфат. Установлено, что процесс сопровождается интенсивным выделением газа, что очевидно связано с разложением сульфидов железа и выделением водорода по реакциям (1) и (2) (известный процесс, сопутствующий разложению бокситов по методу Байера):



В результате прямого щелочного вскрытия томторской руды убыль массы осадка составила около 30% и обуслов-

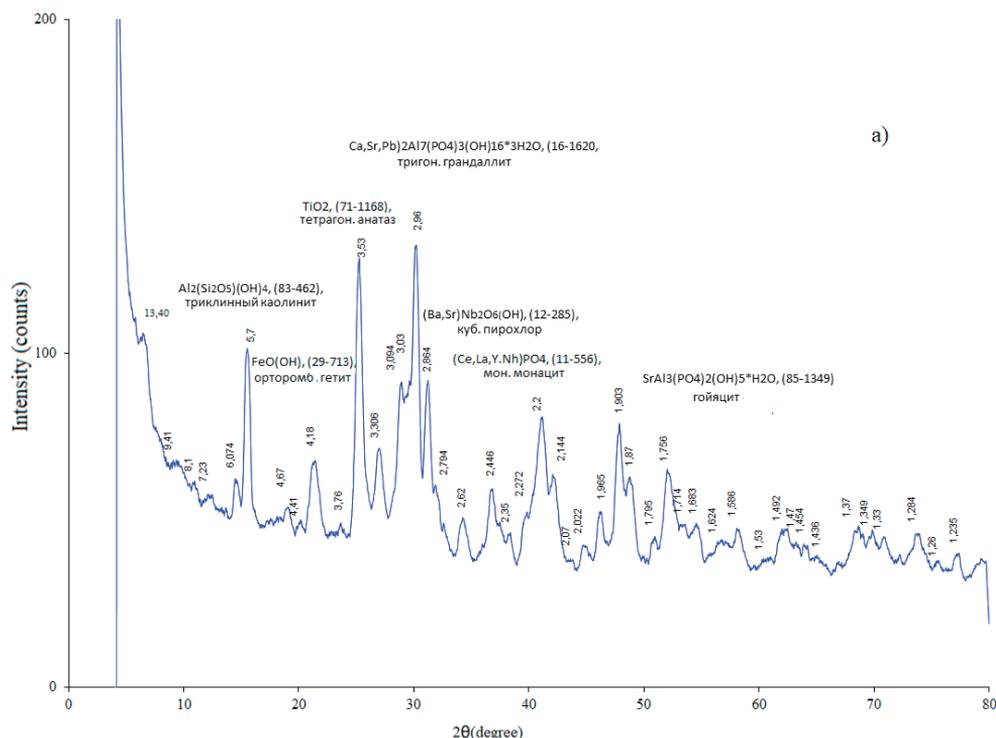


Рисунок 7 – Рентгенограмма исходной руды Томторского месторождения

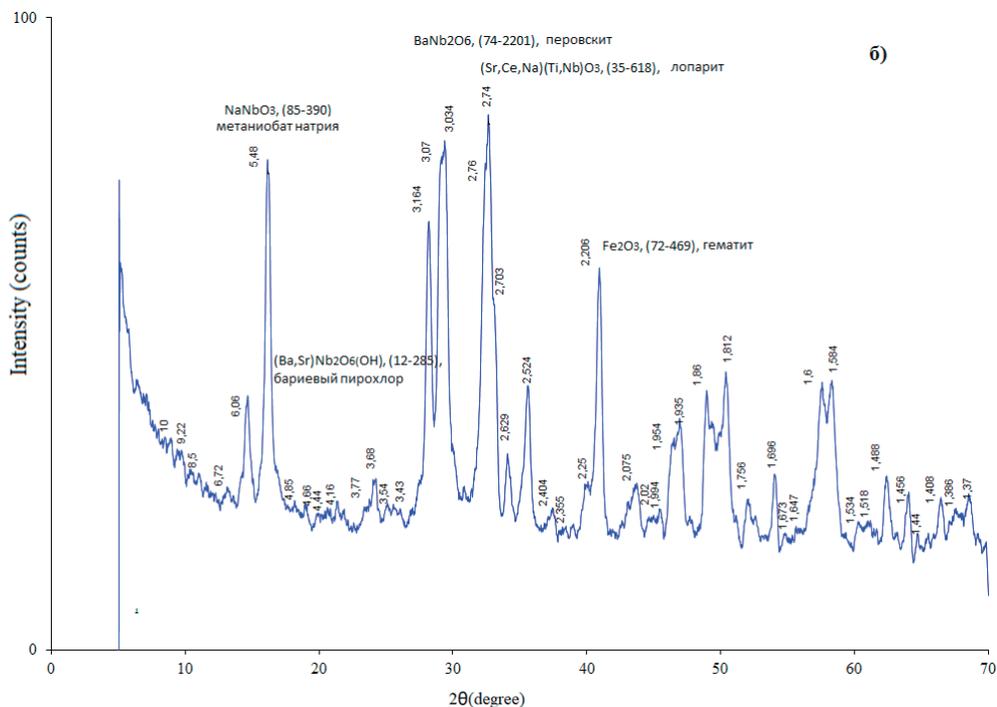


Рисунок 8 – Рентгенограмма руды после щелочной обработки при 210°C

лена переходом в раствор основной массы алюминия (~80%), фосфора (~60%) и разложением карбонатов. По данным рентгенофазового анализа осадка, щелочное вскрытие приводит к полному разложению фосфатов алюминия и монацита. Неполный переход фосфора в раствор связан с высоким содержанием щелочноземельных металлов в руде, фосфаты которых устойчивы в щелочных условиях, однако идентифицировать их по данным РФА проблематично из-за относительно невысоких концентраций в осадках выщелачивания и сложности состава продукта.

Пирохлор (стронций-бариевый) в этих условиях не реагирует с гидроксидом натрия. Повышение температуры до 210°C (автоклавные условия, время выщелачивания - 2 часа) приводит к его частичному разложению с образованием малорастворимого метаниобата

натрия, а также ниобата бария (перовскит). Рентгенограммы исходной руды и руды после щелочной обработки при 210°C приведены на рис. 7, 8

Установлено, что повторное использование щелочного раствора после кристаллизации тринатрийфосфата и доукрепления раствора гидроксидом натрия осложнено постепенным накоплением в растворе алюминия, карбонатов и сульфитов. Показано, что значительная часть алюминия и фосфора может быть удалена из руды предварительной обработкой разбавленным отработанным щелочным раствором. Результаты РФА анализа показывают, что оставшаяся часть алюминия в твердой фазе находится в устойчивой в щелочных растворах форме алюмосиликатов стронция.

При последующем кислотном растворении РЗМ глубина извлечения редкоземельных элементов меняется в зна-

Таблица 2 – Влияние окисления церия на извлечение РЗМ в раствор при азотнокислом выщелачивании (рН=1, t=20°C).

Элемент	Извлечение в растворе, %		
	Ce	La	Nd
Осадок после окислительной обработки	56	62	74
Образец сравнения	79	74	84

чительных пределах от эксперимента к эксперименту, что можно объяснить окислением церия до труднорастворимого в кислых средах оксида церия (IV) кислородом воздуха. Для определения влияния окисления церия кислородом воздуха на процесс выщелачивания редкоземельных элементов было исследовано кислотное растворение РЗМ после щелочного разложения томторской руды в различных условиях.

С этой целью проведена обработка осадков выщелачивания из предыдущего опыта ($C_{\%}(\text{NaOH})=45\%$, температура $\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$) раствором, содержащим 1 М NaOH и 0,5 М перекиси водорода, при отношении Т:Ж=1:8 в течение 1 часа. Обработанный и необработанный окислителем осадки выщелачивали раствором азотной кислоты (1,92 М) при рН=1 потенциометрическим титрованием при интенсивном перемешивании пульпы магнитной мешалкой. По результатам титрования установлено, что на вскрытие обработанного перекисью водорода осадка расходуется заметно меньше кислоты, чем на необработанный – 4,4 и 5,7 моль на кг осадка соответственно.

В таблице 2 приведены данные по извлечению в раствор церия, лантана и неодима. Как видно из таблицы, окисление церия влечет за собой значительное

ухудшение показателей извлечения, как самого церия, так и лантана и неодима. Причина этого достаточно очевидна: при разложении монацита гидроксиды РЗМ образуют твердый раствор и поэтому появление на его поверхности пленки труднорастворимого оксида церия препятствует выщелачиванию РЗМ.

В этой связи для повышения извлечения в раствор лантаноидов необходимо обеспечить меры по предотвращению окисления церия - уменьшить максимально время контакта осадков с воздухом.

Выводы

По данным электронной микроскопии руды Томторского месторождения представлены ультрадисперсными срощенными частицами. Соотношение ниобий/титан в пирохлоре изменяется от 10-15 до 40. Установлено, что щелочная обработка в широком диапазоне концентраций гидроксидов натрия приводит к полному разложению алюмофосфатов с переходом большей части алюминия в раствор и образованием в растворах устойчивых алюмосиликатов стронция. Показано, что пирохлор начинает частично разлагаться при 210°C в автоклавных условиях. Эффективность щелочного вскрытия можно повысить предварительным вскрытием алюмофосфатов разбавленным обработанным раствором гидроксида натрия. Обработка окислителем остатков щелочного разложения снижает степень извлечения редкоземельных элементов при последующей кислотной обработке. Описан возможный механизм влияния кислорода воздуха на процесс кислотного выщелачивания.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-63-10017

Список литературы

- 1 Н.И. Похиленко, А.В. Толстов Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд. //ЭКО Всероссийский экономический журнал. №11. - 2012. - с. 17-28.
- 2 Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов // ЭКО, ISSN: 0131-7652. - 2014. - №2 (476). - С. 22-35.
- 3 Lapin A.V., Tolstov A.V. Rare metals – the first step to richest ore complex of massif Tomtor. Alkaline Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits. Proceedings of XXXII International Conference. Apatity 7-14 August 2015 / Editor-in-chief L.N. Kogarko. – М.: GEOKHI RAS, 2015 - ISBN 978-5-905049-10-1, pp 67-68.
- 4 Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Толстов А.В., Щербов Б.Л. БОГАТЫЕ Nb-REE РУДЫ ТОМТОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ - ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА/ XV МЕЖДУНАРОДНОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ГЕОЛОГИИ РОССЫПЕЙ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ (РКВ-2015). - Пермь. – 2015. - с. 127-129.
- 5 Кузьмин В.И., Ломаев В.Г., Пашков Л.Г., Овчинников С.В., Кузьмина В.Н., Дорохова Л.И. Переработка руд месторождений кор выветривания карбонатитов –будущее редкометалльной промышленности России.// Цветные металлы. -№12.- 2006. - с. 62-68.
- 6 Kuzmin V.I., Flett D.S., Kuzmina V.N., Zhizhaev A.M., Gudkova N.V., Kuzmin D.V., Mulagaleeva M.A., Tolstov A.V., Logutenko O.A. The composition, chemical properties, and processing of the unique niobium-rare earth ores of the Tomtor deposit// CHEMICAL PAPERS. 2019.–V.73, Is.6. – P. 1437-1446.
- 7 Лихникевич Е.Г., Ожогина Е.Г., Пермякова Н.А. МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД//РАЗВЕДКА И ОХРАНА НЕДР . Т6.- 2021. - с. 56-60.
- 8 Делицын Л.М., Синельщиков В.А., Кулумбегов Р.В. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В РАСПЛАВАХ СИСТЕМЫ МОНАЦИТ–NAF// РАСПЛАВЫ. - №5.- 2021. - с. 482-491.

PROBLEMS OF DIRECT ALKALINE ACID PROCESSING OF RARE METAL ORES OF THE TOMTOR DEPOSIT

Kuzmin V.I., Kuzmin D.V., Epov O.A., Zhizhaev A.M., Bondarenko G.V.

Institute of Chemistry and Chemical Technology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences - a separate subdivision of the FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation.

olegepov998@gmail.com.

The Tomtor rare metal deposit is located in the north of Russia in the northwestern part of the Republic of Sakha (Yakutia). According to the composition of ores and their reserves, the deposit is a unique raw material source of rare earth metals (REM), in particular, scandium and niobium [1-3]. The key feature of the ores of the Tomtor deposit is ultradispersion and strong mutual intergrowth of mineral particles [4-7], which makes it inefficient to isolate

monazite and pyrochlore concentrates by known enrichment methods. At the same time, the use of direct opening of such ores inevitably entails a significant consumption of reagents and often makes it economically impossible to develop ore deposits even at high contents of valuable elements. Currently, a number of processes for the direct processing of Tomtor ores have been tested. According to [8], the use of nitric acid solutions showed low efficiency due to low extraction rates of rare earth elements, scandium, and some other elements. The use of a combined scheme using a sulfuric acid solution also proved to be ineffective. Ores can be most effectively opened by the alkaline-acid method, when at the first stage monazite is decomposed with concentrated solutions of sodium hydroxide, and then REM hydroxides are dissolved in nitric or hydrochloric acid.

Table 1 – Composition of an ore sample from the Buranny site of the Tomtor rare metal deposit

Nº	Element, (oxide)	Content, % (mass), [1]
1	ΣP_2O_5	10,2
2	Nb_2O_5	6,7
3	TiO_2	5,0
4	V_2O_5	1,2
5	Al_2O_3	17,1
6	P_2O_5	16,0
7	Fe_2O_3	6,9
8	FeO	5,1
9	CaO	2,6
10	SrO	3,8
11	BaO	3,2
12	ThO_2	0,15
13	UO_3	0,01
14	SiO_2	3,8
15	S	0,2
16	F	0,5

The main problems of the method arise at the first stage - the alkaline decomposition of monazite with the removal of phosphorus along with the leaching solution. Another problem of alkaline-acid processing of Tomtor ores, which is mentioned in the literature [6], is significant fluctuations in the degree of extraction of REM into an acid solution after alkaline opening.

Materials and Methods

In this work, inorganic salts, acids and bases of the «chemically pure» and «pure for analysis» brands were used. Studies on alkaline opening were carried out on a

representative sample of Tomtor ore from the Buranny site. The composition of the ore is presented in table 1.

Alkaline leaching was carried out in a PTFE reactor equipped with a stirrer, in a heated stainless steel ball mill, and in a PTFE-lined steel autoclave. The pulp after opening was filtered on a heated filter press at a temperature of 70-80°C to prevent separation of trisodium phosphate from the solution. The precipitate after separation from the mother liquor was washed with hot water. Then, depending on the problem being solved, the solid and liquid phases were analyzed.

The concentration of elements in the aqueous phase was determined by atomic absorption (Analyst 400 absorption spectrometer (Perkin Elmer), and mass spectrometric methods (ICP-MS 7500C spectrometer (Agilent) with inductively coupled plasma), in the solid phase - by X-ray fluorescence method (spectrometer PANalytical Axios Advanced). X-ray diffraction patterns were recorded on a DRON-3 X-ray diffractometer (Burevestnik, Russia). We also obtained images of the surface layers of leach residues

using a TM-3000 scanning electron microscope (Hitachi, Japan) equipped with a Quantax-70 energy-dispersive analysis system. (Bruker, Germany), S-5500 and SEM NV 1000 electron microscopes with a microanalysis system.

Results and discussions.

Scanning electron microscope (SEM) images were obtained to determine the structure and ratio of elements in the surface layer of ore samples. Rare earth metals are mainly represented by monazite, the particles of which are ultrafine and intergrown with aluminophosphates (Fig. 1).

Pyrochlore is represented by larger particles, the size of which reaches 10-30 microns. It is characterized by two types of particles (Fig. 2-6).

1. Particles of the first type (Fig. 5), associated with calcium and sodium, have a compact and massive structure.

2. Particles of the second type (Fig. 6), associated with strontium - bulbous, have a thin multilayer structure. Such particles are often dissected by veinlets of the aluminophosphate fraction.

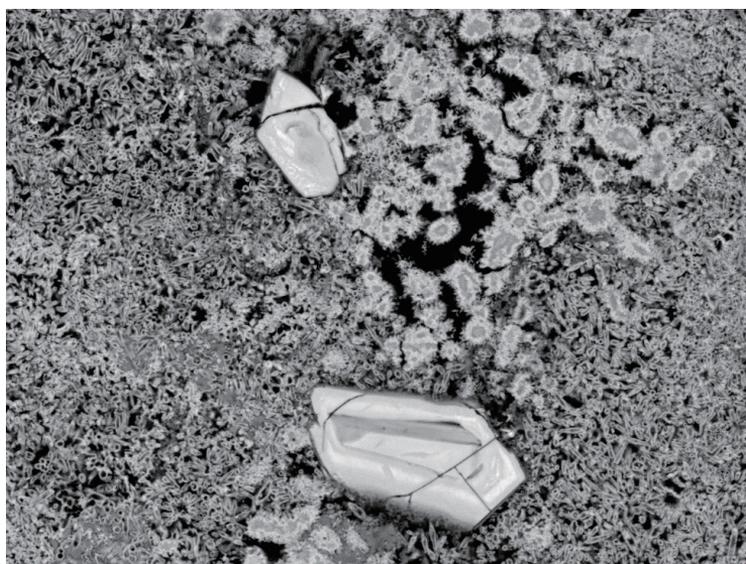


Figure 1 – SEM image of a sample of unground Tomtor ore: gray, small particles - aluminophosphates; light border on particles – monazite; crystals interspersed in the aluminophosphate mass - pyrochlore.

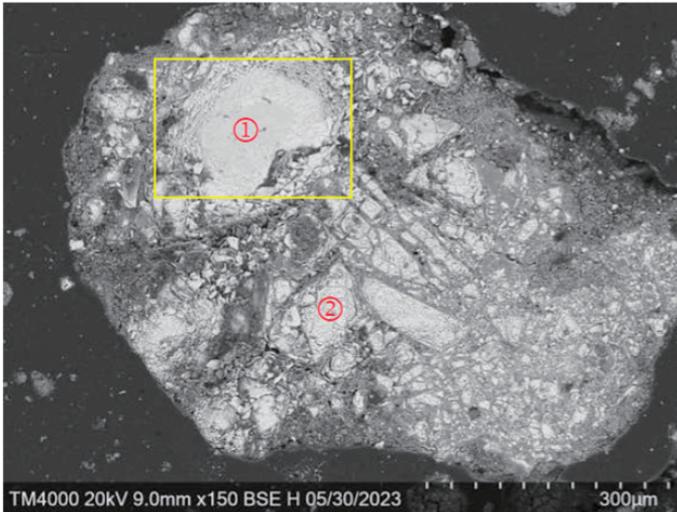


Figure 2 – SEM image of a sample of unground Tomtor ore.

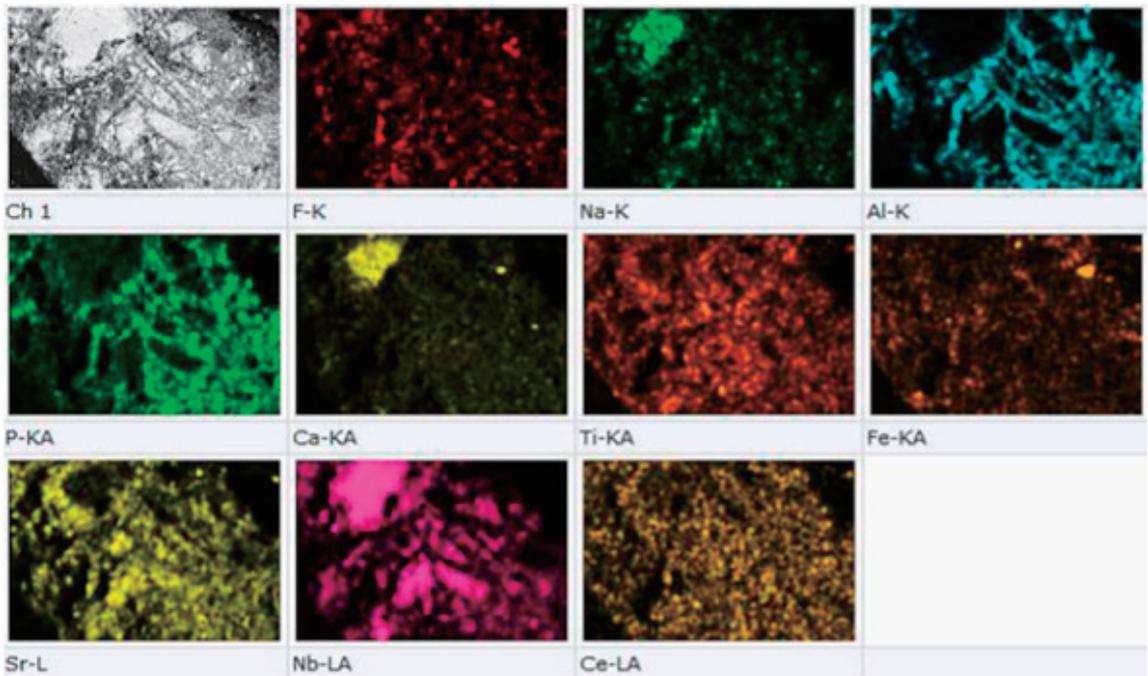


Figure 3 – Maps of the distribution of elements in the area defined by Figure 2.

Particles of the first and second types are often linked into aggregates - particles of the first type are located in the core, around which a shell of particles of the second type is formed. In particles of the second type, the Nb/Ti ratio is 10-15. In particles of the first type - about 40. SEM data confirm that the ore is indeed ultrafine and extremely strong intergrowth of mineral particles is observed.

A direct alkaline opening of the Tomtor ore was carried out with a 45% sodium hydroxide solution at the boiling point of the solution (about 130°C) at a ratio of T:W=1:4, the pulp mixing time was 2 hours. After leaching, the pulp is filtered at a temperature of 80°C, the precipitate is washed from trisodium phosphate with hot 30% sodium hydroxide solution and then with water. When the solution is



Figure 4 – SEM image of fragment 2 Figure 1. Calcium-containing core (dark gray) and multilayer «shell» containing strontium.

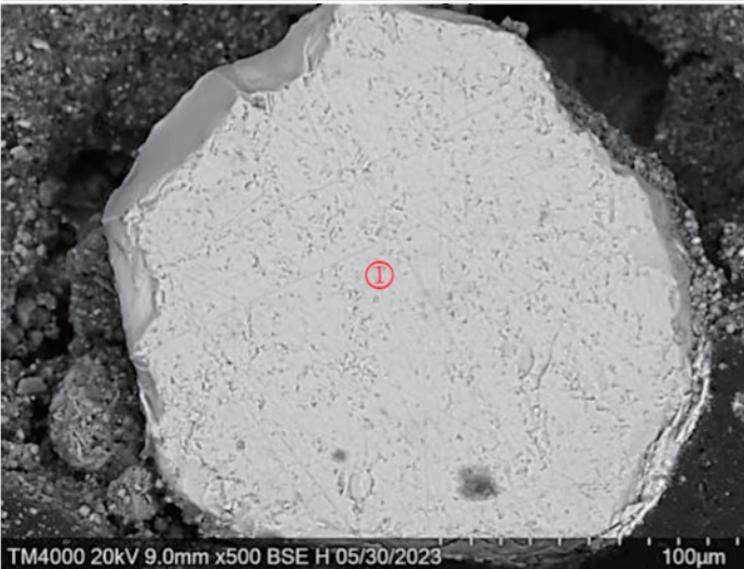


Figure 5 – SEM image of fragment 1 Figure 1. Compact massive particle containing niobium.

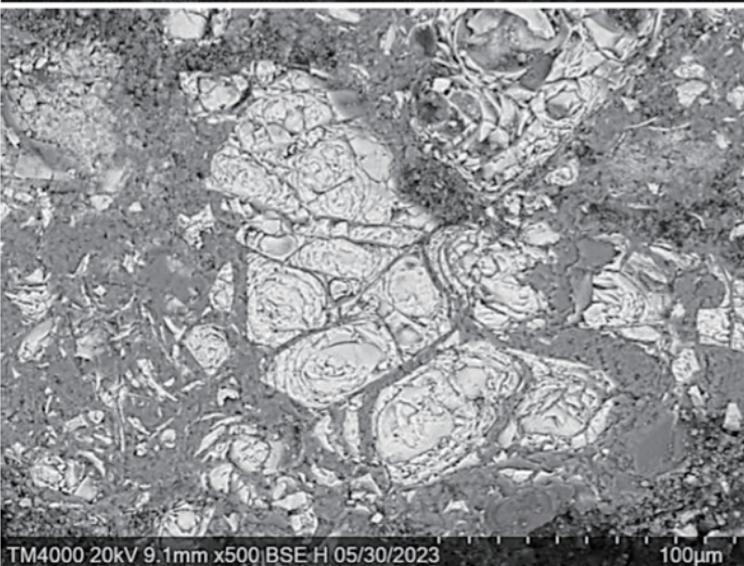
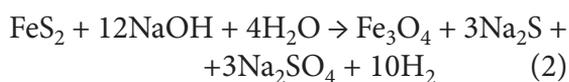
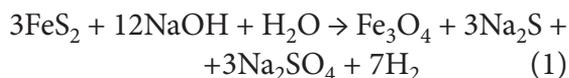


Figure 6 – SEM image of unground ore particles. Bulb-shaped particles containing niobium, dissected by veinlets of the aluminophosphate phase.

cooled, the hydrated trisodium phosphate crystallizes. It has been established that the process is accompanied by intense gas evolution, which is obviously associated with the decomposition of iron sulfides and the evolution of hydrogen according to reactions (1) and (2) (a well-known process accompanying the decomposition of bauxite by the Bayer method):



As a result of direct alkaline opening of the Tomtor ore, the weight loss of the sediment was about 30% and was due to the transition of the bulk of aluminum (~80%)

and phosphorus (~60%) into solution and the decomposition of carbonates. According to the X-ray phase analysis of the sediment, alkaline opening leads to the complete decomposition of aluminum phosphates and monazite. The incomplete transition of phosphorus into solution is associated with a high content of alkaline earth metals in the ore, the phosphates of which are stable under alkaline conditions; however, it is problematic to identify them according to XRD data due to relatively low concentrations in leaching sediments and the complexity of the product composition.

As a result of direct alkaline opening of the Tomtor ore, the weight loss of the sediment was about 30% and was due to the transition of the bulk of aluminum (~80%) and phosphorus (~60%) into solution and the decomposition of carbonates.

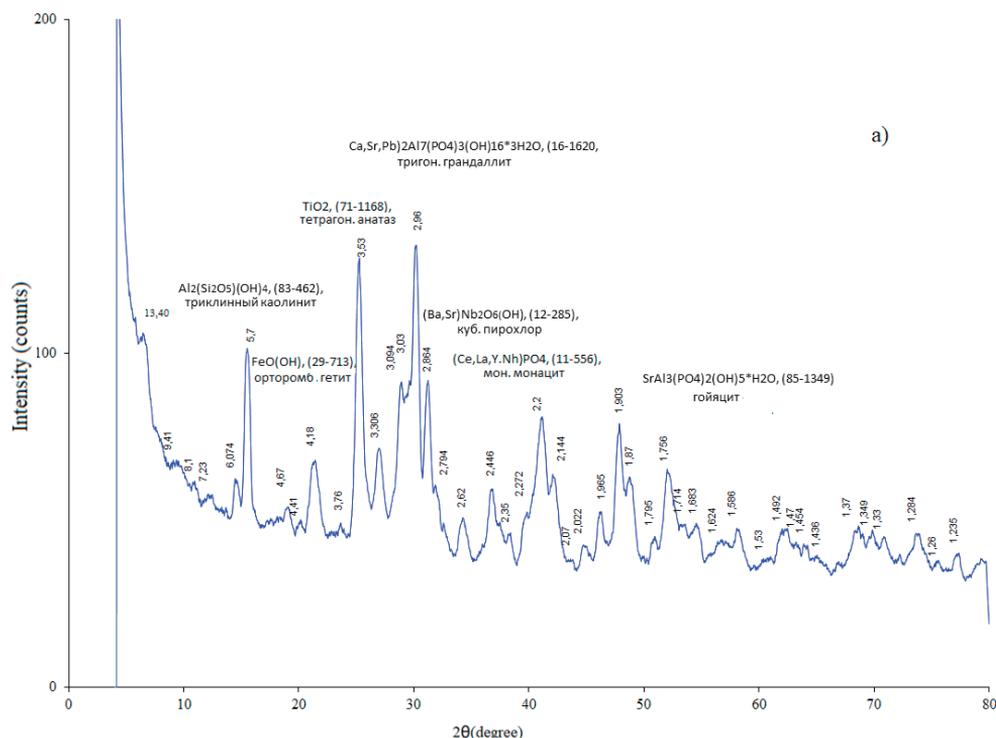


Figure 7 – X-ray pattern of the original ore of the Tomtor deposit

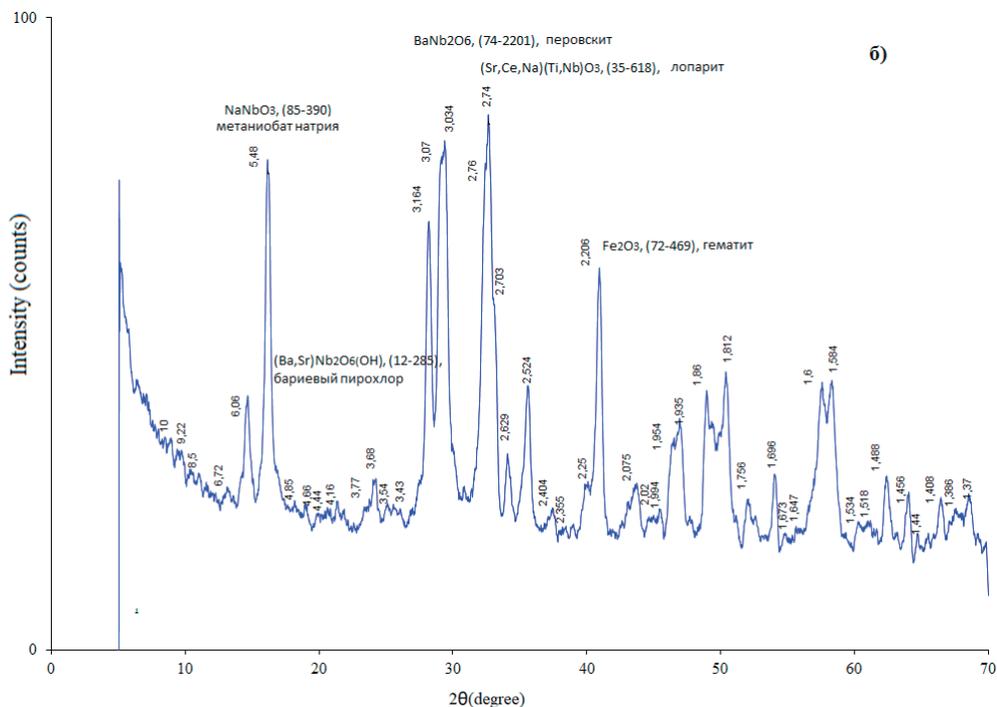


Figure 8 – X-ray pattern of ore after alkaline treatment at 210°C

According to the X-ray phase analysis of the sediment, alkaline opening leads to the complete decomposition of aluminum phosphates and monazite. The incomplete transition of phosphorus into solution is associated with a high content of alkaline earth metals in the ore, the phosphates of which are stable under alkaline conditions; however, it is problematic to identify them according to XRD data due to relatively low concentrations in leaching sediments and the complexity of the product composition.

Pyrochlor (strontium-barium) under these conditions does not react with sodium hydroxide. Increasing the temperature to 210°C (autoclave conditions, leaching time - 2 hours) leads to its partial decomposition with the formation of poorly soluble sodium metaniobate, as well as barium niobate (perovskite). X-ray diffraction patterns of the original ore and the ore after alkali treatment at 210°C are shown in fig. 7, 8.

It has been established that the reuse of an alkaline solution after crystallization of trisodium phosphate and additional strengthening of the solution with sodium hydroxide is complicated by the gradual accumulation of aluminum, carbonates and sulfites in the solution. It is shown that a significant part of aluminum and phosphorus can be removed from the ore by pretreatment with a dilute spent alkaline solution. The results of XPA analysis show that the remaining part of the aluminum in the solid phase is in the form of strontium aluminosilicates, which is stable in alkaline solutions.

With the subsequent acid dissolution of REM, the depth of extraction of rare earth elements varies significantly from experiment to experiment, which can be explained by the oxidation of cerium to cerium (IV) oxide, which is hardly soluble in acidic media, by air oxygen. To determine the

Table 2 – The effect of cerium oxidation on the extraction of REM into solution during nitric acid leaching (pH=1, t=20°C).

Element	Extraction into solution, %		
	Ce	La	Nd
Precipitate after oxidation treatment	56	62	74
Reference sample	79	74	84

effect of cerium oxidation with atmospheric oxygen on the process of leaching of rare earth elements, acid dissolution of REM after alkaline decomposition of Tomtor ore under various conditions was studied.

For this purpose, the leaching sediments from the previous experiment ($C_{\%}(\text{NaOH}) = 45\%$, temperature $\sim 130^{\circ}\text{C}$) were treated with a solution containing 1 M NaOH and 0.5 M hydrogen peroxide, at a ratio of T: W = 1:8 for 1 hours. The precipitates treated and untreated with the oxidizing agent were leached with a solution of nitric acid (1.92 M) at pH=1 by potentiometric titration with intensive stirring of the pulp with a magnetic stirrer. According to the results of titration, it was found that the opening of the precipitate treated with hydrogen peroxide consumes significantly less acid than the untreated one – 4.4 and 5.7 mol per kg of sediment, respectively.

Table 2 shows the data on the extraction of cerium, lanthanum, and neodymium into the solution. As can be seen from the table, the oxidation of cerium entails a significant deterioration in the recovery of both cerium itself and lanthanum and neodymium. The reason for this is quite obvious: during the decomposition of monazite, REM hydroxides form a solid

solution and, therefore, the appearance of a film of sparingly soluble cerium oxide on its surface prevents REM leaching.

In this regard, in order to increase the recovery of lanthanides into the solution, it is necessary to provide measures to prevent the oxidation of cerium - to reduce the maximum contact time of precipitation with air.

Conclusions

According to electron microscopy data, the ores of the Tomtor deposit are represented by ultrafine intergrown particles. The ratio of niobium/titanium in pyrochlore varies from 10–15 to 40. It has been established that alkaline treatment in a wide range of sodium hydroxide concentrations leads to the complete decomposition of aluminophosphates with the transition of most of the aluminum into solution and the formation of stable strontium aluminosilicates in solutions. It has been shown that pyrochlore begins to partially decompose at 210°C under autoclave conditions. The effectiveness of alkaline opening can be increased by preliminary opening of aluminophosphates with a dilute spent sodium hydroxide solution. Treatment with an oxidizing agent of alkaline decomposition residues reduces the degree of extraction of rare earth elements during subsequent acid treatment. A possible mechanism of the effect of atmospheric oxygen on the acid leaching process is described.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-63-10017

References

- 1 Pokhilenko N.P., Tolstov A.V. Prospects for the development of the Tomtor deposit of complex niobium-rare earth ores. // ECO. - 2012. - No. 11. - P. 17-28.
- 2 Pokhilenko N.P., Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. Tomtor as a priority investment project for providing Russia with its own source of rare earth elements // EKO. - 2014. - No. 2 (476). - P. 22-35.
- 3 Lapin A.V., Tolstov A.V. Rare metals – the first step to richest ore complex of massif Tomtor. Alkaline Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits. Proceedings of XXXII International Conference. Apatity 7-14 August 2015 / Editor-in-chief L.N. Kogarko. – M.: GEOKHI RAS, 2015 - ISBN 978-5-905049-10-1, P. 67-68.
- 4 Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Tolstov A.V., Shcherbov B.L. RICH NB-REE ORES OF THE TOMTOR DEPOSIT - ISSUES OF GENESIS / XV INTERNATIONAL MEETING ON GEOLOGY OF PLACERS AND DEPOSITS OF WEATHERING CORPS (RKV-2015) / Perm, August 24–28, 2015. P. 127-129.
- 5 V. I. Kuz'min, V. G. Lomaev, L. G. Pashkov, S. V. Ovchinnikov, V. N. Kuz'mina, and L. I. Dorokhova, J. Appl. Processing of ores from deposits of carbonatite weathering crusts is the future of the rare metal industry in Russia.// Non-ferrous metals. - No. 12. - 2006. - P. 62-68.
- 6 Kuzmin V.I., Flett D.S., Kuzmina V.N., Zhizhaev A.M., Gudkova N.V., Kuzmin D.V., Mulagaleeva M.A., Tolstov A.V., Logutenko O.A. The composition, chemical properties, and processing of the unique niobium-rare earth ores of the Tomtor deposit// CHEMICAL PAPERS. 2019.–V.73, Is.6. – P. 1437-1446.
- 7 Likhnikovich E.G., Ozhogina E.G., Permyakova N.A. MINERALOGICAL FORECAST OF THE SELECTION OF TECHNOLOGIES FOR PROCESSING RARE METAL ORES//EXPLORATION AND PROTECTION OF SUBSOIL . T6.- 2021.- P.56-60.
- 8 Delitsyn L.M., Sinelshchikov V.A., Kulumbegov R.V. PHASE TRANSFORMATIONS IN MELTS OF THE MONAZITE–NAF SYSTEM// MELTS. - No. 5.- 2021. - P. 482-491.