

EDN: QFZISM

УДК 546.650:542.61

Features of Direct Alkaline Processing of Rare-Metal Ores of the Tomtor Deposit

Vladimir I. Kuzmin, Dmitry V. Kuzmin*,
Oleg A. Epov and Galina N. Bondarenko

*Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS
Federal Research Center “Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS”
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 17.07.2023, received in revised form 30.10.2023, accepted 01.11.2023

Abstract. Direct alkaline decomposition of rare-metal Tomtor ore under various conditions has been studied. It has been established that associated minerals (aluminophosphates, iron carbonates and sulfides) are decomposed by sodium hydroxide solutions and significantly reduce the activity of the circulating alkaline solution. Pre-treatment of ore with dilute spent alkaline solutions makes it possible to decompose aluminophosphates with their partial conversion into soluble forms and aluminosilicates stable in alkaline solutions. It is shown that significant fluctuations in the release of rare-earth metals into solution during subsequent acid leaching of cakes from alkaline opening are associated with partial oxidation of cerium by atmospheric oxygen.

Keywords: rare earth metals, Tomtor deposit, leaching, precipitation.

Acknowledgments. This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 23–63–10017).

Citation: Kuzmin V. I., Kuzmin D. V., Epov O. A., Bondarenko G. N. Features of direct alkaline processing of rare-metal ores of the Tomtor deposit. *J. Sib. Fed. Univ. Chem.*, 2023, 16(4), 584–594. EDN: QFZISM



Особенности прямого щелочного вскрытия редкометалльных руд Томторского месторождения

**В. И. Кузьмин, Д. В. Кузьмин,
О. А. Эпов, Г. Н. Бондаренко**

*Институт химии и химической технологии СО РАН
ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Исследовано прямое щелочное разложение редкометалльной томторской руды в различных условиях. Установлено, что попутные минералы (алюмофосфаты, карбонаты и сульфиды железа) разлагаются растворами гидроксида натрия и существенно снижают активность обратного щелочного раствора. Предварительная обработка руды разбавленными отработанными щелочными растворами позволяет разложить алюмофосфаты с частичным переводом их в растворимые формы и устойчивые в щелочных растворах алюмосиликаты. Показано, что значительные колебания выхода в раствор редкоземельных металлов при последующем кислотном выщелачивании кеков щелочного вскрытия связаны с частичным окислением церия кислородом воздуха.

Ключевые слова: редкоземельные металлы, томторская руда, выщелачивание, осаждение.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23–63–10017.

Цитирование: Кузьмин В. И., Кузьмин Д. В., Эпов О. А., Бондаренко Г. Н. Особенности прямого щелочного вскрытия редкометалльных руд Томторского месторождения. Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2023, 16(4). С. 584–594. EDN: QFZISM

Введение

Томторское месторождение редкометалльных руд расположено на севере России в арктической части Республики Саха (Якутия). По составу руд и их запасам месторождение является уникальным сырьевым источником редкоземельных металлов – скандия и ниобия [1–3]. По данным геологических исследований [1], среднее содержание ценных элементов в рудах составляет: оксид ниобия – 6,71 %, оксид иттрия – 0,6 %, оксид скандия – 0,05 %, сумма оксидов редкоземельных металлов (РЗМ) – около 10 %, а общие ресурсы: пентаоксид ниобия – 73,64 млн т, сумма редкоземельных оксидов – 153,7 млн т, пентаоксид фосфора – около 2 млрд т. Особенностью этих руд, важной для разработки технологий, является невозможность выделения монацитового и пирохлорового концентратов с использованием известных методов обогащения. Это обусловлено ультрадисперсностью руд и сросшенностью минеральных частиц [4–7], размеры которых составляют десятки–сотни нанометров. В этой связи для извлечения РЗМ и ниобия требуется прямая химическая переработка руд.

В настоящее время апробировано несколько технологических процессов пиро- и гидрометаллургической переработки томторских руд. В работах [8–11] проведены исследования по гидрометаллургической ликвационной плавке руд. Показана возможность разделения компонентов руды в этом процессе на два продукта – фосфатный, содержащий РЗМ, и силикатный, в котором концентрируется ниобий. Полученные продукты могут далее перерабатываться различными методами с получения редкоземельной и ниобиевой продукции.

Другое направление – прямая гидрометаллургическая переработка руд. Процесс основан на первичной химической обработке руд с целью перевода РЗМ в раствор и концентрирование ниобия в кеках выщелачивания. С этой целью могут быть использованы известные методы переработки монацитовых концентратов, их кислотное и щелочно-кислотное вскрытие с отделением фосфора от РЗМ. Из кислотных методов переработки монацитовых концентратов наибольшее распространение получило вскрытие концентрированной серной кислотой. Однако его применение для прямой переработки томторских руд ограничено из-за высокого расхода серной кислоты на вскрытие руды и больших объемов производственных отходов, получающихся при этом вскрытии. По данным работы [11], применение для извлечения РЗМ из томторских руд растворов азотной кислоты, а также комбинированного процесса с использованием раствора серной кислоты, показало низкую эффективность из-за невысоких показателей извлечения редкоземельных элементов, скандия и некоторых других элементов.

По практике переработки монацитовых концентратов для томторских руд представляется целесообразным использование щелочно-кислотного вскрытия. Этот процесс можно реализовать в различных вариантах. Основные проблемы возникают на первой стадии – щелочного разложения монацита с удалением фосфора в виде тринатрийфосфата. Как нами было установлено ранее [5, 6], при обработке томторских руд концентрированными щелочными растворами (45 % и более) образующийся при разложении монацита тринатрийфосфат может вступать во вторичную реакцию с соединениями щелочноземельных металлов с образованием мало-растворимых фосфатов, что может существенно снизить эффективность отделения фосфора от РЗМ и ниобия. Другой проблемой может быть снижение активности оборотного щелочного раствора за счет накопления в них карбонатов и алюминия. В связи с этим была предложена схема двухстадийной щелочной обработки руды. Согласно предложенному процессу для снижения расхода реагентов на первой стадии руду обрабатывают разбавленным отработанным щелочным раствором для удаления основного количества алюминия. Затем полученный твердый продукт разлагают 45 %-ным раствором гидроксида натрия, что обеспечивает повышение эффективности стадии щелочного разложения монацита.

В настоящей работе проведены исследования такого процесса с учетом известного опыта переработки алюминиевого сырья методом Байера. По этому процессу накоплен огромный практический опыт, исследовано поведение различных минералов алюминия, титана, кремния, ванадия и других металлов.

Экспериментальная часть

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

Таблица 1. Состав образца руды участка Буранный Томторского редкометалльного месторождения

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

№ п/п	Элемент, (оксид),	Содержание,% (масс), [1]
1	S	10,2
2	Nb ₂ O ₅	6,7
3	TiO ₂	5,0
4	V ₂ O ₅	1,2
5	Al ₂ O ₃	17,1
6	P ₂ O ₅	16,0
7	Fe ₂ O 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

Щелочное вскрытие руды при температуре 100–130 °С проводили в реакторе из фторопласта, снабженного мешалкой и обратным холодильником. Для разложения руды при более высоких температурах (200–210 °С) использовали вращающиеся стальные автоклавы, футерованные фторопластом. Пульпу после вскрытия фильтровали на обогреваемом фильтр-прессе при температуре 70–80 °С для предотвращения выделения из раствора тринатрийфосфата. Осадок после отделения от маточного раствора промывали горячей водой. Затем, в зависимости от решаемой задачи, анализировали твердую и жидкую фазы.

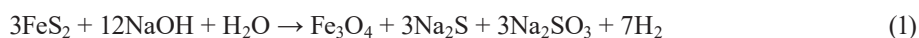
Концентрацию элементов в водной фазе определяли атомно-абсорбционным (абсорбционный спектрометр Analyst 400 (Perkin Elmer), и масс-спектрометрическими методами (спектрометр ICP-MS7500C (Agilent) с индуктивно-связанной плазмой), в твердой фазе – рентгено-флюоресцентным методом (спектрометр PANalytical Axios Advanced). Регистрацию рентгеновских дифрактограмм проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (Буревестник, Россия).

Результаты и обсуждения

При переработке монацитовых концентратов для разложения фосфатов РЗМ используют концентрированные растворы гидроксида натрия с его содержанием выше 40 %. Процесс проводят при температуре 110–130 °С. Эти условия щелочного разложения близки к условиям вскрытия бокситов по процессу Байера (автоклавное щелочное вскрытие при температурах 150–170 °С). Учитывая это, опыт переработки бокситового сырья можно использовать для оценки поведения ряда минеральных компонентов при щелочном вскрытии томторской руды.

Можно ожидать, что в щелочных растворах в первую очередь будут разлагаться алюмофосфаты, мольная доля которых в томторских рудах наиболее высока. Однако выход в раствор алюминия и фосфора в значительной степени зависит от присутствия других минералов. По практике вскрытия бокситового сырья максимальная величина выхода алюминия в раствор определяется кремниевым модулем сырья (отношением содержаний в руде Al_2O_3 и SiO_2), из-за образования малорастворимого алюмосиликата натрия состава: $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,7\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [12]. Алюмосиликаты образуются в несколько стадий, через образование растворимых в воде силикатов натрия (метасиликата и полисиликатов натрия). Состав гидроалюмосиликата натрия непостоянен и зависит от условий осаждения. При производстве глинозема методом Байера образование соединений с кремнием обуславливает основные потери окиси алюминия и щелочи с красным шламом. Добавки извести приводят к образованию гидрограната – $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot (6-2m)\text{H}_2\text{O}$, что обеспечивает снижение потерь щелочи со шламом. Скорость и полнота растворения свободного кремнезема и каолинита сильно зависят от их модификации и размеров частиц.

Из других попутных элементов в томторской руде, которые могут влиять на процесс, являются титан, железо и щелочноземельные металлы. В процессах Байера титан не переходит в щелочной раствор в заметных количествах, однако влияет на скорость вскрытия бокситов за счет образования на поверхности минералов алюминия защитной пленки титаната натрия. Одной из наиболее вредных примесей считаются карбонаты железа (сидерит), кальция (известняк) и магнезия (доломит), которые разлагаются щелочами с образованием карбонатов натрия и соответствующих гидроксидов металлов. Это приводит к снижению активности щелочи, что важно также для вскрытия монацита. Другой примесью, приводящей к аналогичному эффекту, являются сульфиды железа. Степень перехода серы в алюминатный раствор при выщелачивании бокситов зависит от ее минералогической формы и структуры. Пирит, содержащийся в томторской руде, разлагается при щелочной обработке по реакциям (1) и (2) [13, 14]. Процесс сопровождается выделением водорода.



Учитывая содержание пирита в томторской руде до 1 % (0,1 моль/кг), можно ожидать снижения концентрации гидроксида натрия за счет образования сульфидов, сульфитов и сульфатов натрия, а также выделения более 5–6 л водорода на 1 кг руды при вскрытии.

Проведено прямое щелочное вскрытие томторской руды 45 %-ным раствором гидроксида натрия при температуре кипения раствора (около 130 °С) при отношении Т: Ж=1:4 и перемешивании пульпы в течение 2 часов. Пульпу фильтруют при температуре 80 °С, осадок отмывают от тринатрийфосфата горячим 30 %-ным раствором гидроксида 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). В результате разложения алюмофосфатов убыль массы кека составляет около 30 % и обусловлена переходом в раствор основной массы алюминия (~80 %), фосфора (~60 %) и разложением карбонатов. По данным рентгенофазового анализа кека, щелочное вскрытие руды в этих условиях приводит к полному

разложению фосфатов алюминия и монацита. Неполнота перехода фосфора в раствор связана с высоким содержанием щелочноземельных элементов в руде, фосфаты которых устойчивы в щелочных растворах. Однако идентифицировать их по данным рентгенофазового анализа проблематично из-за относительно невысоких концентраций в кеках выщелачивания и сложности состава продукта. Пироксид (стронций-бариевый) в этих условиях не реагирует с гидроксидом натрия. Повышение температуры до 210 °С (автоклавное вскрытие) приводит к его частичному разложению с образованием малорастворимого метаниобата натрия, а также перовскита – ниобата бария. Рентгенограммы исходной руды и руды после щелочной обработки при 210 °С приведены на рис. 1а и 1б.

На практике щелочное вскрытие монацита проводят при значительном избытке щелочи для поддержания необходимого уровня концентрации выщелачивающего реагента. Для снижения удельного расхода щелочи используют оборотный раствор после кристаллизации тринатрийфосфата и доукрепления его гидроксидом натрия. Оценена возможность такого варианта прямого щелочного вскрытия томторской руды и влияния накопления примесей на показатели вскрытия.

На рис. 2. приведена зависимость остаточной концентрации фосфора в кеке после выщелачивания руды оборотным раствором 45 % щелочи от количества циклов использования щелочного раствора. Каждый цикл включает: выщелачивание руды при температуре кипения раствора (около 130 °С), $T: Ж=1:4$, $\tau=2$ часа; кристаллизацию тринатрийфосфата при охлаждении раствора и его отделение; корректировку содержания натрия, добавлением щелочи, и частичную кристаллизацию гидроокиси алюминия контактированием раствора над затравкой $Al(OH)_3$ в течение 5–6 часов. Как видно из приведенных данных, содержание фосфора в кеке монотонно возрастает, что свидетельствует об ухудшении вскрытия монацита из-за накопления в нем примесей и снижении активности щелочного раствора.

В этой связи представляется целесообразным проводить предварительную обработку руды разбавленными отработанными щелочными растворами для разложения легко вскрываемых минералов (алюмофосфатов, карбонатов).

Процесс разложения фосфатов алюминия разбавленными растворами гидроксида натрия протекает достаточно быстро и при температуре около 100 °С завершается за 1,5–2 часа перемешивания фаз. Кинетическая зависимость содержания алюминия в растворе от времени выщелачивания 4 моль/л раствором гидроксида натрия приведена на рис. 3.

По данным рентгенофазового анализа (рис. 4), через 2 часа щелочной обработки алюмофосфаты в твердой фазе не обнаруживаются. Однако поскольку в руде присутствуют кремний и щелочноземельные металлы, то часть алюминия образует с ними малорастворимые алюмосиликаты, образование которых проявляется на дифрактограмме и приводит к некоторому снижению концентрации алюминия с ростом времени выщелачивания (рис. 3).

Таким образом, предварительная щелочная обработка разбавленными отработанными щелочными растворами приводит к полному разложению алюмофосфатов. Использование этой стадии позволит предотвратить снижение активности щелочного раствора при вскрытии монацита в томторской руде. Доля удаляемого алюминия зависит от состава руды и отношения содержаний алюминий/кремний (кремниевого модуля), а также от температуры и времени выщелачивания.

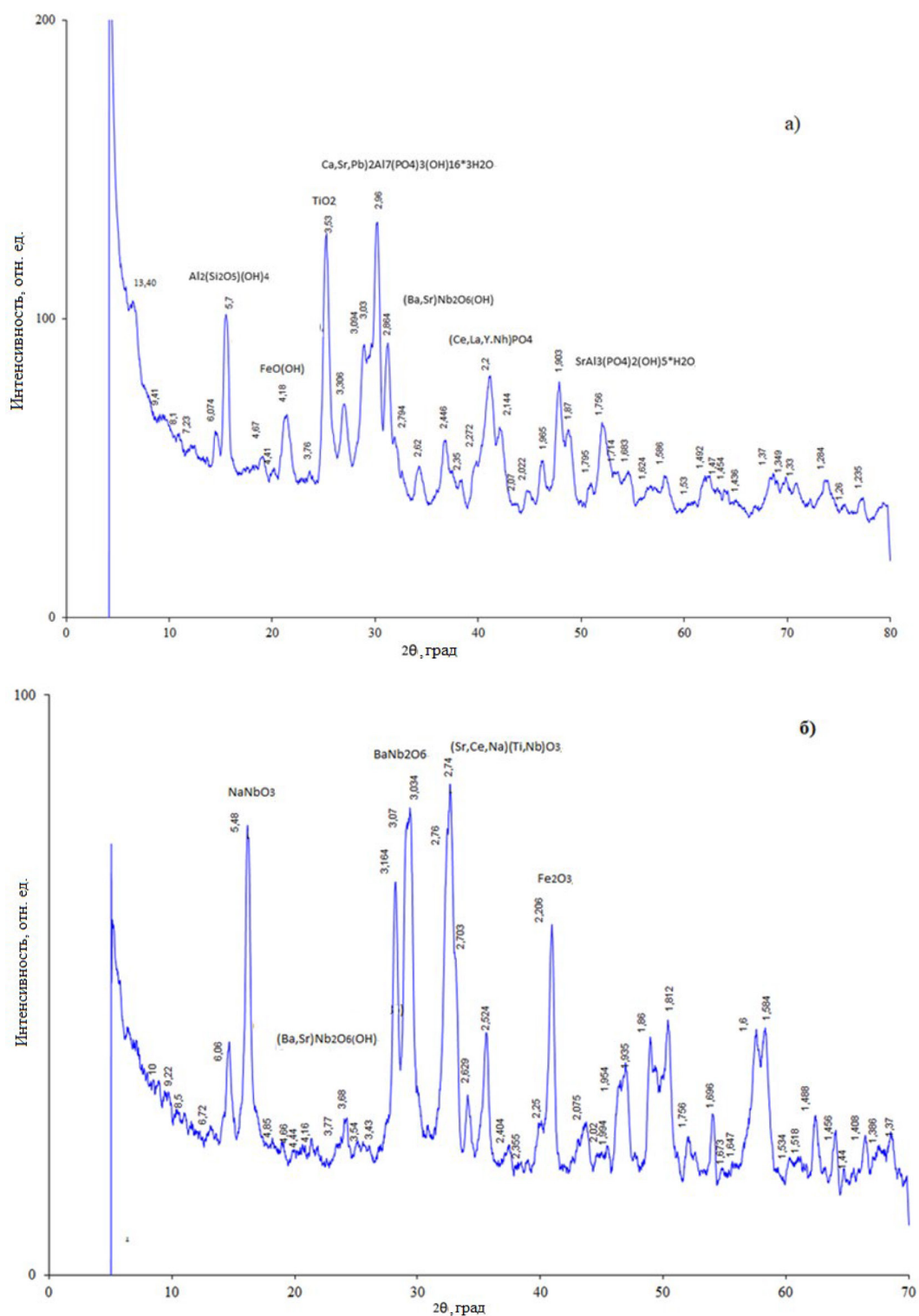


Рис. 1. Рентгенограммы исходной руды (а) и руды после обработки 45 %-ным раствором NaOH при 210 °С (в автоклаве) в течение 2 часов (б)

Fig. 1. X-ray patterns of the original ore (a) and ore after treatment with 45 % NaOH solution at 210 °C (in autoclave) for 2 hours (b)

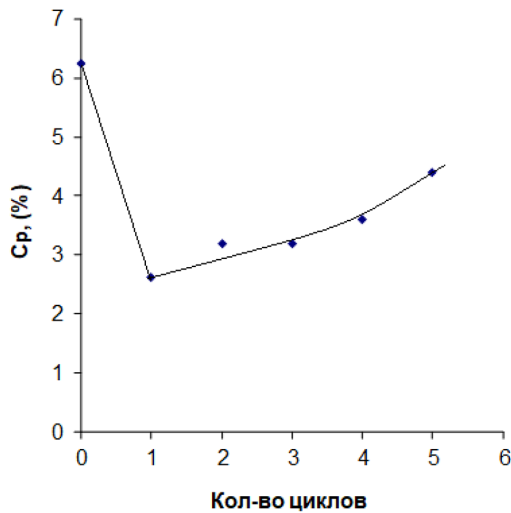


Рис. 2. Зависимость содержания фосфора в кеке выщелачивания томторской руды от количества циклов использования щелочного раствора

Fig. 2. Dependence of the phosphorus content in the leaching cake of the Tomtor ore on the number of cycles of using an alkaline solution

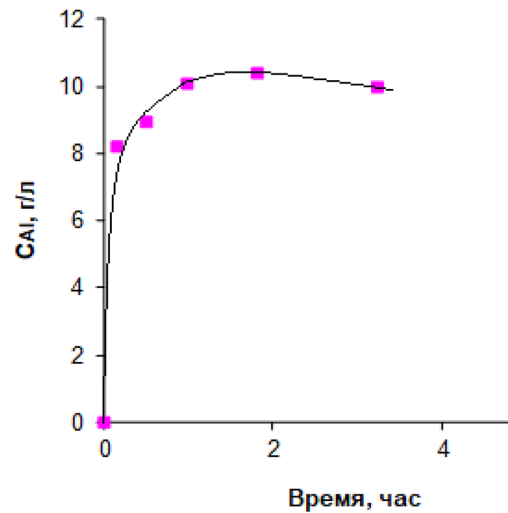


Рис. 3. Изменение концентрации алюминия в водном растворе при выщелачивании томторской руды 14 %-ным (4 моль/л) раствором гидроксида натрия ($T=95\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T: \text{Ж}=1:5$)

Fig. 3. Change in the concentration of aluminum in an aqueous solution during the leaching of Tomtor ore with a 4 mol/l solution of sodium hydroxide ($T=95\text{ }^{\circ}\text{C}$, $s: l=1:5$)

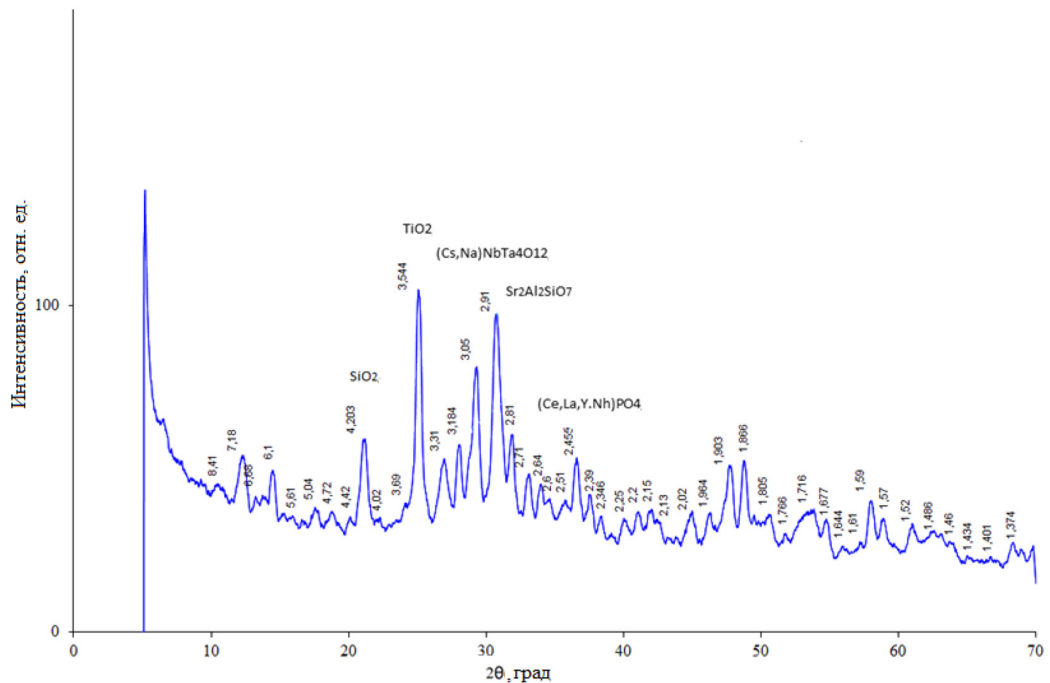


Рис. 4. Рентгенограмма руды после обработки разбавленными растворами NaOH (14 %) при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов

Fig. 4. X-ray pattern of the ore after treatment with dilute NaOH solutions (14 %) at $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 2 hours

Другой проблемой щелочно-кислотной переработки томторских руд, на которую ранее было обращено внимание [6], может быть возможное влияние окисления церия кислородом воздуха в процессах многостадийной щелочной обработки руд. На это было обращено внимание при исследовании кислотного растворения РЗМ после щелочного разложения монацита. Этот процесс протекает легко даже при комнатной температуре в слабокислой среде (при $\text{pH}=1$). Было установлено, что глубина извлечения редкоземельных элементов в этих условиях сильно колеблется от эксперимента к эксперименту, что предположительно может быть связано с окислением церия до труднорастворимого в кислотах диоксида металла.

Для проверки этого предположения проведено щелочное вскрытие томторской руды в прежних условиях (раствор гидроксида натрия 45 %, температура ~ 130 °С). Затем часть отмытого осадка обрабатывали раствором, содержащим 1М NaOH и 0,5М перекиси водорода при отношении Т: Ж=1:8 в течение 1 часа. Обработанный окислителем осадок и осадок сравнения (кек после щелочного разложения) выщелачивали при $\text{pH}=1$ раствором азотной кислоты. Процесс проводили при комнатной температуре в режиме титрования осадка раствором азотной кислоты (1,92 М) при постоянной pH раствора (контроль по показаниям pH -метра) и при интенсивном перемешивании пульпы на магнитной мешалке. По результатам титрования установлено, что на вскрытие обработанного перекисью водорода расходуется заметно меньше кислоты, чем на неокисленный образец. В целом расход азотной кислоты на выщелачивание составил соответственно 4,4 и 5,7 моль HNO_3 на 1 кг кека. В табл. 2 приведены данные по извлечению

Таблица 2. Влияние окисления церия на извлечение РЗМ в раствор при азотнокислом выщелачивании ($\text{pH}=1$, $t=20$ °С)

Table 2. The effect of cerium oxidation on the extraction of REM into solution during nitric acid leaching ($\text{pH}=1$, $T=20$ °С)

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

в раствор церия, лантана и неодима. Как видно из таблицы, окисление церия влечет за собой значительное ухудшение показателей извлечения как самого церия, так и других РЗМ, в данном случае лантана и неодима. Причина этого достаточно очевидна: при разложении монацита гидроксиды РЗМ образуют твердый раствор и поэтому появление на его поверхности пленки труднорастворимого диоксида церия препятствует выщелачиванию лантана, неодима и других РЗМ.

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

Заключение

Полученные результаты по прямому вскрытию томторской руды концентрированными водными растворами гидроксида натрия показывают, что активность щелочного раствора значительно снижается за счет разложения алюмофосфатов, карбонатов и сульфидов железа, присутствующих в руде. При этом если тринатрийфосфат кристаллизуется при охлаждении, то другие примеси (алюминий, сульфиты, карбонаты) накапливаются в растворе, что усложняет использование оборотного раствора после его доукрепления гидроксидом натрия. Фазовый анализ продуктов разложения руды показывает, что в избытке 45 %-ного раствора гидроксида натрия при температуре около 130 °С алюмофосфаты и монацит полностью разлагаются. Пиррохлор заметно не реагирует со щелочью в этих условиях. Его частичное разложение наблюдается при температуре 210 °С. Предварительная отмывка руды разбавленными отработанными щелочными растворами гидроксида натрия (до 4 моль/л) позволяет разложить алюмофосфаты. При этом, в соответствии с известными данными по поведению минералов в процессе щелочного разложения бокситов (процесс Байера), часть алюминия образует устойчивые в щелочных растворах алюмосиликаты, что снижает его накопление в оборотном щелочном растворе для выщелачивания монацита.

Установлено, что при обработке кеков щелочного вскрытия томторской руды окислителем (перекисью водорода) существенно снижается извлечение редкоземельных металлов в раствор при их последующем кислотном вскрытии. Это, видимо, обусловлено образованием защитной пленки диоксида церия на твердых растворах гидроокисей РЗМ. В этой связи процессы щелочного вскрытия руды необходимо проводить в инертной атмосфере.

Список литературы / References

- [1] Похиленко Н.И., Толстов А.В. Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд. *Всероссийский экономический журнал “ЭКО”* 2012. 11. 17–28. [Pokhilenko N.I., Tolstov A.V. Prospects for the development of the Tomtor deposit of complex niobium-rare earth ores. *All-Russian economic journal «ECO»* 2012. 11. 17–28. (in Rus.)]
- [2] Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов. *Всероссийский экономический журнал “ЭКО”* 2014. 2(476). 22–35. [Pokhilenko N.P., Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N. Yu. Tomtor as a priority investment project to provide Russia with its own source of rare earth elements. *All-Russian economic journal “ECO”* 2014. 2(476). 22–35. (in Rus.)]
- [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*. Moscow. GEOKHI RAS, 2015 – ISBN 978–5–905049–10–1, 67–68.
- [4] Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Толстов А.В., Щербов Б.Л. Богатые NB-REE руды Томторского месторождения – вопросы генезиса. *Международное совещание по геологии россыпей и месторождений кор выветривания (PKB-2015). Пермь, 24–28 августа 2015*. 127–129. [Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Tolstov A. V., Shcherbov B. L. Rich in NB-REE ores of the Tomtor deposit – questions of genesis. *International Meeting on the Geology of Placers and Weathering Crust Deposits (RKV-2015) Perm, August 24–28, 2015*, 127–129. (in Rus.)]

[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 редкометальной промышленности России. *Цветные металлы* 2006. 12. 62–68. [Kuzmin V.I., Lomaev V.G., Pashkov L.G., Ovchinnikov S.V., Kuzmina V.N., Dorokhova L.I. Processing of ores from carbonatite weathering crust deposits is the future of Russia's rare metal industry. *Non-ferrous metals* 2006. 12. 62–68. (in Rus.)]

[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. 73(6). 1437–1446.

[7] Лихникевич Е.Г., Ожогина Е.Г., Пермякова Н.А. Минералогический прогноз выбора технологий переработки редкометалльных руд. *Разведка и охрана недр* 2021. 6. 56–60. [Likhnikovich E.G., Ozhogina E.G., Permyakova N.A. Mineralogical forecast for the choice of technologies for processing rare metal ores. *Exploration and protection of mineral resources* 2021. 6. 56–60. (in Rus.)]

[8] Делицын Л.М., Мелентьев Г.Б., Зиновеев Д.В., Дюбанов В.Г. Переработка продуктов ликвационной плавки руды Томторского месторождения. *Металлы* 2019. 4. 10–17. [Delitsyn L.M., Melentiev G.B., Zinoveev D.V., Dyubanov V.G. Processing of products of separation smelting of ore from the Tomtor deposit. *Metals* 2019. 4. 10–17. (in Rus.)]

[9] Делицын Л.М., Батенин В.М. Термодинамика расплавов в основе технологии переработки богатейших редкометалльных руд Томторского месторождения. *Теплофизика высоких температур* 2020. 58(4). 634–640. [Delitsyn L.M., Batenin V.M. Thermodynamics of melts in the basis of technology for processing the richest rare-metal ores of the Tomtor deposit. *Thermophysics of High Temperatures* 2020. 58(4). 634–640. (in Rus.)]

[10] Delitsyn L.M., Sinel'shchikov V.A., Batenin V.M., Sychev G.A., Borodina T.I., Val'yano G.E. Phase crystallization in the CePO₄-NaF system. *Doklady Chemistry* 2018. 483(2). 323–327.

[11] Делицын Л.М., Синельщиков В.А., Кулумбегов Р.В. Фазовые превращения в расплавах системы монацит-NaF. *Расплавы* 2021. 5. 482–491. [Delitsyn L.M., Sinelshchikov V.A., Kulumbegov R.V. Phase transformations in melts of the monazite-NaF system. *Melts* 2021. 5. 482–491 (in Rus.)]

[12] Лайнер А.И., Еремин Н.И., Лайнер Ю.А., Певзнер И.З. Производство глинозема. *Металлургия*. 1978. 64. [Liner A.I., Eremin N.I., Liner Yu.A., Pevsner I.Z. Alumina production. *Metallurgy*. 1978. 64 (in Rus.)]

[13] Кузнецов С.И., Деревянкин В.А. Физическая химия процесса производства глинозема по способу Байера. *Металлургия*. 1942. 352. [Kuznetsov S.I., Derevyankin V.A. Physical chemistry of the alumina production process by the Bayer method. *Metallurgy*. 1942. 352 (in Rus.)]

[14] Лайнер А.И. Производство глинозема. *Металлургия*. 1961. 620. [Liner A.I. Alumina production. *Metallurgy*. 1961. 620 (in Rus.)]