ПОВЕДЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ПИРОХЛОР-МОНАЦИТ-ГЕТИТОВЫХ РУД

Н.А. Пермякова^{1,2,@}, Е.И. Лысакова¹, С.И. Ануфриева², Е.Г. Лихникевич²

¹МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского, Москва, 119017 Россия

@Автор для переписки, e-mail: permyakovana@mitht.ru

Работа посвящена выявлению особенностей поведения редкоземельных металлов при гидрометаллургической переработке пироксид-монацит-гётитовых руд Чукотского рудного поля, являющегося потенциальным источником получения РЗМ. Указанные руды практически необогатимы. Предложены гидрометаллургические методы их комплексной переработки. Изучено агитационное и автоклавное азотнокислое выщелачивание в зависимости от таких технологических параметров, как температура, концентрация HNO_3 , продолжительность процесса, отношение Т:Ж и др. Рассмотрена возможность перевода марганца, в значительных количествах присутствующего в руде, в азотнокислый раствор пероксидом водорода. На основании результатов проведенных исследований дана оценка распределения РЗМ по продуктам гидрометаллургического процесса. Выявлено, что при агитационном выщелачивании имеет место неполное вскрытие рудного материала: степень извлечения РЗМ в раствор составляет в среднем 60%. Решена задача очистки азотнокислых растворов от фосфора, затрудняющего последующее экстракционное извлечение и разделение ионов РЗМ, которые образуют с фосфором прочные комплексы. Удаление фосфора из раствора достигается путем проведения процесса под давлением при повышенных температурах (200–230 °С). Установлено, что оптимальными условиями разложения, обеспечивающими перевод почти 99% РЗМ в азотнокислый раствор, являются: автоклавное выщелачивание 25%-ым раствором HNO_3 , крупность руды -0.071 мм; 5% об. H_2O_2 ; τ (160 °С) = 1 ч; τ (230 °С) = 1 ч, последовательное повышение температуры от 160 до 230 °С; Т:Ж=1:8. Автоклавное азотнокислое выщелачивание позволяет обеспечить отделение РЗМ от основной части железа, фосфора и ниобия.

Ключевые слова: пироксид-монацит-гётитовые руды, редкоземельные металлы, агитационное выщелачивание, автоклавное выщелачивание, азотная кислота, обесфосфоривание, пероксид водорода.

Для цитирования: Пермякова Н.А., Лысакова Е.И., Ануфриева С.И., Лихникевич Е.Г. Поведение редкоземельных металлов при гидрометаллургической переработке пироксид-монацит-гётитовых руд // Тонкие химические технологии / Fine Chemical Technologies. 2018. Т. 13. № 3. С. 64–71.

BEHAVIOR OF RARE-EARTH METALS IN HYDROMETALLURGICAL PROCESSING OF PYROCHLOR-MONAZITE-GOETHITE ORES

N.A. Permyakova^{1,2,@}, E.I. Lysakova¹, S.I. Anufrieva², E.G. Likhnikovich²

¹MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

²N.M. Fedorovsky All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources, Moscow 119017, Russia

@Corresponding author e-mail: permyakovana@mitht.ru

The article is dedicated to finding out the specific features of the behavior of rare-earth metals in hydrometallurgical processing of pyrochlore-monazite-goetite ores of the Chuktukonsky ore field is shown in the work. Chuktukonsky ore field is a potential source of rare earth metals. The mentioned ores are practically unenforceable. Hydrometallurgical methods for their complex processing were suggested. Agitational and autoclave nitric acid leaching depending on such technological parameters as temperature, HNO_3 concentration, process duration, S:L ratio and the use of H_2O_2 were studied. The possibility of transferring manganese (that is present in a significant amount in the ore) into a nitric acid solution by hydrogen peroxide was considered. Based on the results of the conducted studies, the distribution of REM in the products of the hydrometallurgical conversion of pyrochlore-monazite-goetite ore was estimated. It was found out that incomplete opening of the ore material was observed during agitational leaching: average REM recovery into the solution is 60%. The study made it possible to solve the problem of purifying nitric acid solutions from phosphorus that hinders the subsequent extraction and separation of rare earth metal ions forming strong complexes with rare earths. Removal of phosphorus from the solution was achieved by conducting the process under pressure at elevated temperatures (200–230 °C). It was found that the optimal decomposition conditions ensuring the transfer of almost 99% of the REM into the nitric acid solution are: 25% solution of HNO_3 , ore size – 0.071 mm; 5% by volume H_2O_2 ; $t(160^\circ\text{C}) = 1 \text{ h}$; $t(230^\circ\text{C}) = 1 \text{ h}$, gradual temperature increase from 160 to 230 °C; S:L = 1:8. Autoclave nitric-acid leaching allows selecting rare earth metals from the main part of iron, phosphorus and niobium.

Keywords: pyrochlor-monazite-goethite ores, rare-earth metals, agitational leaching, autoclave leaching, nitric acid, dephosphorization, hydrogen peroxide.

For citation: Permyakova N.A., Lysakova E.I., Anufrieva S.I., Likhnikovich E.G. Behavior of rare-earth metals in hydrometallurgical processing of pyrochlor-monazite-goethite ores. *Tonkie khimicheskie tekhnologii / Fine Chemical Technologies*. 2018; 13(3): 64–71. (in Russ.)

Введение

Уникальные физико-химические свойства редкоземельных металлов (РЗМ) определяют возможность их широкого использования как в виде коллективного редкоземельного концентрата, так и в виде индивидуальных металлов. Они активно вовлечены в сферу высокотехнологичных производств: сегодня РЗМ играют исключительно важную роль в развитии современных и перспективных технологий в электронике, «зеленой» энергетике, военной и аэрокосмической промышленности и т.п. [1].

Россия располагает мощным минерально-сырьевым потенциалом РЗМ. Запасы РЗМ учтены Госбалансом в 17 месторождениях, в том числе в 4 комплексных месторождениях, в которых РЗМ – основной компонент: Ловозерское, Катугинское, Томторское и Чуктуконское. Однако из 17 месторождений РЗМ в настоящее время разрабатывают только одно – Ловозерское, в котором РЗМ выступают основными полезными компонентами наряду с танталом, ниобием и титаном [2, 3]. Таким образом, для восстановления и дальнейшего развития промышленного производства РЗМ Россия остро нуждается в освоении и разработке новых месторождений. Потенциальным источником получения РЗМ могут стать пирохлор-монацит-гётитовые руды Чуктуконского рудного поля. Среднее содержание РЗМ в этих рудах колеблется в интервале 5.11–5.34%. Руды содержат всю сумму РЗМ, причем доминирующую роль играют элементы цериевой подгруппы.

Главными породообразующими минералами руд Чуктуконского месторождения являются оксиды и гидроксиды железа (гётит, гематит) и марганца (пиролюзит, псиломелан). Минералы РЗМ представлены флоренситом и монацитом. Ниобиевую минерализацию несут минералы группы пирохлора, представленные стронциевой, бариевой и цериевой разновидностями. Железистые минералы по содержанию значительно преобладают над пирохлором и монацитом [4]. Следует отметить, что указанные руды практически необогатимы вследствие высокой дисперсности минералов, образования сложных типов сростаний гидроксидов железа с пирохлором, монацитом, тонких прорастаний с минералами группы крадаллита, повышенной хрупкости пирохлора и склонности его к переизмельчению. Поэтому при разработке технологии и выборе метода переработки руды, который позволит достичь полного раскрытия рудного материала и добиться высоких показателей извлечения, необходимо учитывать его текстурно-структурные особенности.

При разработке технологии комплексной переработки пирохлор-монацит-гётитовых руд Чуктуконского рудного поля исследованы гидрометаллургические методы [5–7], которые являются более экономичными по сравнению с пирометаллургическими, а также дают возможность с высокими технологическими показателями селективно извлекать ценные компоненты в продукты гидрометаллургического передела.

Цель работы – определение оптимальных режимов переработки пирохлор-монацит-гётитовых руд гидрометаллургическим методом и оценка распределения РЗМ по продуктам гидрометаллургического передела.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования служила рудная проба, отобранная на Чуктуконском рудном поле, минеральный состав которой представлен в табл. 1¹.

Таблица 1. Минеральный состав пробы руды Чуктуконского рудного поля

Минерал	Теоретическая формула	Содержание, % масс.
Гётит	$\text{FeO}(\text{OH})$	40
Гематит	Fe_2O_3	4
Минералы группы крандаллита	$\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$	9
Монацит	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th})\text{PO}_4$	11
Пирохлор	$(\text{NaCa})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH}, \text{F})$	1
Апатит (франколит)	$(\text{Ca}, \text{Sr})_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$	0.5
Кварц	SiO_2	1
Анализ	TiO_2	0.5
Пирролизит	MnO_2	4
Голландит	$\text{MnBaMn}_6\text{O}_{14}$	1
Пиломелан	$m\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	3–5

Выщелачивание проводили водными растворами технической 57%-ной азотной кислоты (ОСТ 113-03-270-90). Ввиду наличия в руде значительного количества марганца (1.51–27.11% MnO) целесообразно рассматривать также возможность его извлечения из азотнокислых растворов. Для перевода марганца в раствор использовали 37%-ный технический пероксид водорода (H_2O_2) марки А.

Агитационное выщелачивание вели в стеклянном стакане, снабженном механической стеклянной мешалкой, автоклавное – в стальных (сталь марки Ст-3) автоклавных бомбочках вместимостью 70 см³ (рис. 1). Они состоят из корпуса (1), закрывающегося

пробкой (3). Герметизация достигается с помощью уплотнительного кольца из фторопласта (5), прижимного кольца (4) и накидной гайки (2). Коэффициент заполнения автоклавной бомбочки 0.7; скорость вращения 30–40 об/мин.

На рис. 2 приведена схема установки для автоклавного вскрытия. Стальные бомбочки (рис. 1) закрепляются в гнездах перпендикулярно к валу (10), вращающемуся внутри воздушного термостата (3), представляющего собой разъемную электропечь. Вал приводится в движение с помощью электродвигателя (8) посредством редуктора (7). Для измерения и регулирования температуры используется пироме-

Рис. 1. Автоклавная бомбочка.

Рис. 2. Установка для автоклавного выщелачивания.

¹Минеральный и химический состав рудной пробы устанавливали в аналитическом сертификационном испытательном центре ФГБУ «ВИМС» методом рентгенофазового анализа и атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой, соответственно.

трический милливольтметр со шкалой 0–400 °С (6) в комплекте с термопарой (2) и реле (4). Контрольный термометр (5) служит для точного измерения температуры. Автоклавы с приводом укреплены на подвижной каретке (8). Вся установка монтируется на сварной подставке (1).

Измельченную руду и выщелачивающий раствор загружали в автоклавную бомбочку, помещали в термостат, где и выдерживали при заданных условиях опытов. Перемешивание пульпы обеспечивает вращение автоклавной бомбочки «через голову». По завершении опыта автоклавную бомбочку охлаждали в течение 3–5 мин в проточной холодной воде, открывали и фильтрацией отделяли жидкую фазу от нерастворившегося остатка. Фильтрат и нерастворившийся остаток анализировали на содержание ценных компонентов.

Результаты и их обсуждение

Как показали предварительные исследования [8, 9], перспективным методом вскрытия пироксид-монацит-гётитовых руд является азотно-кислотное выщелачивание. Выбор азотной кислоты в качестве вскрывающего реагента для гидрометаллургической переработки, с одной стороны, обусловлен особенностями ее взаимодействия с рудными минералами [10], с другой – предопределяет возможность разделения РЗМ экстракцией трибутилфосфатом (ТБФ) из азотнокислых растворов, успешно зарекомендовавшей себя в промышленной практике. Для оценки поведения РЗМ при гидрометаллургической переработке пироксид-монацит-гётитовых руд были проведены исследования на пробе руды, характеризующейся повышенным содержанием не только

РЗМ, но и таких элементов, как ниобий, марганец, железо и фосфор, % масс.: 0.98 Nb₂O₅; 12.0 Mn; 3.90 P₂O₅; 34.0 Fe; 5.55 ΣРЗМ; 0.14 Y; 0.050 Th; 3.47 Al₂O₃; 0.68 TiO₂. Цериевая подгруппа РЗМ в этой пробе преобладает над иттриевой и составляет порядка 98%. Основная доля (~95%) РЗМ цериевой подгруппы приходится на лантан, церий, празеодим, неодим.

С целью определения оптимальных условий разложения руды исследовали влияние концентрации азотной кислоты (10–56%), продолжительности выщелачивания (1–3 ч), крупности исходной руды (–0.071 мм; –0.2 мм), температуры автоклавного выщелачивания (от 140–160 до 210–230 °С) на показатели извлечения ценных компонентов в раствор (РЗМ, Mn).

Установлено, что при агитационном выщелачивании наблюдается неполное вскрытие рудного материала, а степень извлечения РЗМ в раствор составляет в среднем 60%. Кроме того, с увеличением концентрации HNO₃ до 56% (табл. 2) и продолжительности агитационного выщелачивания до 3 ч (табл. 3) повышается степень извлечения в раствор не только РЗМ, но и фосфора, и железа. Указанные примеси в дальнейшем могут отрицательно сказаться на процессе экстракции. Извлечение марганца в раствор не превышает 40% даже при условии добавления в выщелачивающий раствор H₂O₂ (табл. 4), что, по всей видимости, связано с разложением пероксида водорода на воздухе, в отличие от проведения процесса в герметично закрытой аппаратуре (автоклаве).

При гидрометаллургической переработке пироксид-монацит-гётитовых руд необходимо решить задачу очистки азотнокислых растворов от фосфора, затрудняющего экстракционное извлечение и разделение РЗМ вследствие комплексообразования.

Таблица 2. Влияние концентрации HNO₃ на показатели извлечения ценных компонентов в раствор при агитационном выщелачивании: крупность руды –0.071 мм, Т:Ж = 1:4, t = 80±5 °С, τ = 1 ч, 5% H₂O₂

Концентрация азотной кислоты	Степень извлечения полезного компонента в раствор, %				
	MnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	ΣРЗО*
20%	25.1	30.4	10.5	13.8	50.0
25%	35.2	40.4	13.7	11.3	67.4
56%	39.8	53.2	18.4	0	88.2

*ΣРЗО – сумма оксидов РЗМ.

Таблица 3. Влияние продолжительности процесса на показатели извлечения ценных компонентов в раствор при агитационном выщелачивании: крупность руды –0.071 мм, Т:Ж = 1:4, t = 80±5 °С, C_{HNO3} = 25%, 5% H₂O₂

Продолжительность процесса	Степень извлечения полезного компонента в раствор, %				
	MnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	ΣРЗО*
1 ч	35.2	40.4	13.7	11.3	67.4
2 ч	36.4	45.7	19.1	8.3	81.1
3 ч	40.3	55.2	35.4	1.4	89.0

Таблица 4. Влияние H_2O_2 на показатели извлечения ценных компонентов в раствор при агитационном выщелачивании: крупность руды -0.071 мм, Т:Ж = 1:4, $t = 80 \pm 5$ °C, $\tau = 1$ ч, $C_{HNO_3} = 25\%$

Присутствие пероксида водорода в выщелачивающем растворе	Степень извлечения полезного компонента в раствор, %				
	MnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	ΣРЗО
с добавлением H ₂ O ₂	35.2	40.4	13.7	11.3	67.4
без добавления H ₂ O ₂	14.5	32.0	10.9	2.9	62.7

Удаление фосфора из раствора достигается проведением процесса под давлением при повышенных температурах (200–230 °C). В этом случае

образуется оксид железа(III), а фосфор осаждается в виде малорастворимых гидроксофосфатов железа:

В связи с этим последовательное повышение температуры автоклавного выщелачивания от 140–160 до 200–230 °C будет способствовать более полному концентрированию фосфора и железа в нерастворимом остатке и позволит уже на следующей стадии извлекать РЗМ из обесфосфоренных азотнокислых растворов экстракцией трибутилфосфатом [5].

Уменьшение крупности руды от -0.2 до -0.071 мм практически не влияет на показатели извлечения ценных компонентов (MnO, Nb₂O₅, оксиды РЗМ).

Увеличение продолжительности выщелачивания от 0.5 до 1 ч при увеличении температуры до 210–230 °C (процесс в автоклавных условиях) способствует повышению степени извлечения РЗМ в раствор от 73 до 89% (табл. 5). Однако дальнейшее увеличение продолжительности выщелачивания до

3 ч с одновременным повышением температуры до 230 °C сопровождается уменьшением степени извлечения РЗМ от 89 до 47%, что может быть связано либо с окислением Se^{3+} до Se^{4+} , либо с осаждением оксидов РЗМ на развитой поверхности железосодержащих минералов.

В табл. 6–8 приведены данные по влиянию расхода реагента (Т:Ж), концентрации HNO₃, введения пероксида водорода на показатели извлечения при автоклавном выщелачивании (выделены условия максимального извлечения).

Из представленных данных видно, что увеличение соотношения Т:Ж до 1:8 и концентрации азотной кислоты до 25% приводит к повышению степени извлечения ΣРЗМ в раствор от 30% до практически количественного. Введение пероксида водорода (2.5–7.5% об.) практически не оказывает влияния на

Таблица 5. Влияние продолжительности процесса на показатели извлечения ценных компонентов в раствор при автоклавном выщелачивании: крупность руды -0.071 мм, Т:Ж = 1:4, $t = 160$ –230 °C, $C_{HNO_3} = 25\%$, 5% H₂O₂

Продолжительность процесса, ч (температура, °C)	Степень извлечения полезного компонента в раствор, %				
	MnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	ΣРЗО
0.5 (160 °C) + 0.5 (230 °C) = 1 ч	94.0	53.5	30.0	25.08	72.7
1 (160 °C) + 1 (230 °C) = 2 ч	94.3	0	13.9	7.39	89.2
1 (160 °C) + 2 (230 °C) = 3 ч	94.2	36.6	25.2	24.0	47.4

Таблица 6. Влияние расхода реагента (Т:Ж) на показатели извлечения ценных компонентов в раствор при автоклавном выщелачивании: крупность руды -0.071 мм, 1 ч (160 °C) + 1 ч (230 °C), $C_{HNO_3} = 25\%$, 5% H₂O₂

Отношение Т:Ж	Степень извлечения полезного компонента в раствор, %				
	MnO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	ΣРЗО
1:2	78.0	2.46	26.8	19.9	57.6
1:4	94.3	0	13.9	7.39	89.2
1:6	92.3	6.35	30.8	13.0	88.6
1:8	96.2	0	1.53	0	100

Таблица 7. Влияние концентрации HNO_3 на показатели извлечения ценных компонентов в раствор при автоклавном выщелачивании: крупность руды -0.071 мм, 1 ч (160 °C) + 1 ч (230 °C), Т:Ж=1:4; 5% H_2O_2

Концентрация азотной кислоты	Степень извлечения полезного компонента в раствор, %				
	MnO	P_2O_5	Fe_2O_3	Nb_2O_5	$\Sigma\text{PЗМ}$
10%	96.0	11.7	8.73	5.64	30.25
18%	96.3	23.0	12.2	7.07	52.1
25%	94.8	2.14	21.7	15.8	90.2

Таблица 8. Влияние добавок H_2O_2 на показатели извлечения ценных компонентов в раствор при автоклавном выщелачивании: крупность руды -0.071 мм, 1 ч (160 °C) + 1 ч (230 °C), Т:Ж=1:4, $C_{\text{HNO}_3} = 25\%$

Присутствие пероксида водорода в выщелачивающем растворе	Степень извлечения полезного компонента в раствор, %				
	MnO	P_2O_5	Fe_2O_3	Nb_2O_5	$\Sigma\text{PЗМ}$
Без добавления H_2O_2	16.3	92.7	19.6	16.9	84.2
С добавлением H_2O_2	94.3	0	13.9	7.39	89.2

степень извлечения РЗМ в раствор, но степень извлечения марганца в раствор возрастает от 16 до 94% за счет перевода его в кислоторастворимую форму по реакции:

Заключение

Нами выявлены особенности поведения РЗМ при гидрометаллургической переработке пирохлор-монацит-гётитовых руд, руководствуясь которыми можно определить оптимальные режимы переработки сырья подобного состава с целью получения качественных промежуточных и товарных продуктов переработки, а также показать эффективность и целесообразность выбранной технологии переработки сырья. Установлено, что:

- для разложения пирохлор-монацит-гётитовых руд оправданно и целесообразно применение автоклавного режима выщелачивания, при котором удается достичь отделения РЗМ и марганца от железа, фосфора и ниобия;

- оптимальными условиями разложения пирохлор-монацит-гётитовых руд являются: 25%-ный раствор HNO_3 , крупность руды -0.071 мм; 5% H_2O_2 ; τ (160 °C) = 1 ч; τ (230 °C) = 1 ч, последовательное повы-

шение температуры от 160 до 230 °C; Т:Ж = 1:8, при этом степень извлечения в раствор $\Sigma\text{PЗМ}$ составила почти 99%, MnO – 95-96%; Fe_2O_3 – 1-2%;

- ниобий, железо и фосфор практически полностью концентрируются в кеке выщелачивания, который может быть переработан щелочными [11] или сольвометаллургическими [12–14] методами с получением ликвидной товарной продукции.

Следует отметить, что помимо сложного характера руд Чуктуконского рудного поля, характерной их чертой является радиоактивность, обусловленная наличием урана, тория и продуктов их распада. Содержание радиоактивных металлов в руде составляет порядка 0.1-0.2% по оксиду тория и около 0.01% по оксиду урана. При автоклавном азотнокислотном выщелачивании в оптимальных условиях радиоактивные примеси полностью концентрируются в азотнокислом растворе и впоследствии могут быть удалены гидролизом или экстракцией по стандартным технологиям.

Список литературы

1. Быховский Л.З., Левченко Е.Н., Онтеева Т.Д., Пикалова В.С., Рогожин А.А. Перспективы обеспечения потребностей высокотехнологичных производств России редкометалльным минеральным сырьем // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 106–115.
2. Быховский Л.З., Потанин С.Д., Котельников Е.И. О перспективах и очередности освоения минерально-сырьевого потенциала редкоземельного и

References:

1. Bykhovskiy L.Z., Levchenko E.N., Ontoeva T.D., Picalova V.S., Rogozhin A.A. Prospects for high-tech industries Russia needs rare metal mineral raw materials. *Razvedka i okhrana neдр* (Prospect and Protection of Mineral Resources). 2016; (9): 106-115. (in Russ.).
2. Bykhovskiy L.Z., Potanin S.D., Kotelnikov E.I. On the prospects and priorities for developing the mineral and raw materials potential rare-earth and scandium raw

скандиевого сырья России // Разведка и охрана недр. 2016. № 8. С. 3–8.

3. Быховский Л.З., Архипова Н.А. Рудная база стратегических редких металлов России: состояние, перспективы освоения и развития // Горный журнал. 2017. № 7. С. 4–9.

4. Лихникевич Е.Г., Пермякова Н.А., Сычева Н.А. Особенности поведения марганца и редкоземельных элементов при гидрометаллургической переработке комплексных редкометалльно-редкоземельных руд // Разведка и охрана недр. 2016. № 7. С. 51–54.

5. Коровин С.С., Зими́на Г.В., Резник А.М. [и др.] Редкие и рассеянные элементы. Химия и технология. В 3-х книгах. Книга I: Учебник для вузов. М.: МИСИС, 1996. 376 с.

6. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. Металлургия редких металлов. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1991. 432 с.

7. Вольдман Г.М., Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов. Учебное пособие для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 464 с.

8. Кузьмин В.И., Шабанов В.Ф., Кузьмин Д.В. Способ переработки железистых редкоземельных фосфатных руд: пат. 2551332 Рос. Федерация. № 2013153434/02; заявл. 02.12.2013; опубл. 20.05.2015. Бюл. № 14.

9. Лихникевич Е.Г., Петрова Н.В., Михайлова Н.С. [и др.] Комплексная переработка ниобий-редкоземельно-фосфатных руд гидрометаллургическим способом // Разведка и охрана недр. 1999. № 1. С. 42–43.

10. Филиппов А.П., Нестеров Ю.В. Редокс-процессы и интенсификация выщелачивания металлов. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2009. 543 с.

11. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г., Елютин А.В., Захаров А.М. Ниобий и тантал. М.: Металлургия, 1990. 296 с.

12. Чекмарев А.М. Сольвометаллургия – перспективное направление металлургии редких и цветных металлов. М.: ЗАО «Изд-во Атомиздат», 2004. 190 с.

13. Громов П.Б., Муждабаева М.А., Копкова Е.К., Серба Н.В. Извлечение ниобия и тантала при разложении висмутотанталита минеральными кислотами // Цветные металлы. 2018. № 1. С. 28–33.

14. Громов П.Б., Дрогобужская С.В., Копкова Е.К., Муждабаева М.А. Выщелачивание ниобия(V) и тантала(V) из плумбомикролита неводным растворителем на основе одноатомных алифатических спиртов // Хим. технология. 2015. Т. 16. № 1. С. 39–45.

materials of Russia. *Razvedka i okhrana nedr* (Prospect and Protection of Mineral Resources). 2016; (8): 3-8. (in Russ.).

3. Bykhovskiy L. Z., Arkhipova N. A. Ore base of strategic rare metals of Russia: State, prospects for development and development. *Gornyi zhurnal* (Mining Journal). 2017; (7): 4-9. (in Russ.).

4. Likhnikievich E.G., Permyakova N.A., Sycheva N.A. The behavior of manganese and rare earth elements in the hudrometallurgical processing of complex rare-metal-rare-earth ores. *Razvedka i okhrana nedr* (Prospect and Protection of Mineral Resources). 2016; (7): 51-54. (in Russ.).

5. Korovin S.S., Zimina G.V., Reznik A.M. [et al.] Rare and scattered elements. Chemistry and technology. In three books. Book I. Moscow: MISIS Publ., 1996. 376 p. (in Russ.).

6. Zelikman A.N., Korshunov B.G. Metallurgy of rare metals. 2nd edition. Moscow: Metallurgiya Publ., 1991. 432 p. (in Russ.).

7. Vol'dman G.M., Zelikman A.N. The theory of hydrometallurgical processes. 4th edition. Moscow: Internet Engineering Publ., 2003. 464 p. (in Russ.).

8. Kuzmin V.I., Shabanov V.F., Kuzmin D.V. Method for processing ferrous rare-earth phosphate ores: pat. 2551332 Russian Federation. No. 2013153434/02; filled 02.12.2013; publ. 20.05.2015.

9. Likhnikievich E.G., Petrova N.V., Mikchailova N.S. [et al.] Complex processing of niobium-rare-earth-phosphate ores by hydrometallurgical method. *Razvedka i okhrana nedr* (Prospect and Protection of Mineral Resources). 1999. (1): 42-43. (in Russ.).

10. Philippov A.P., Nesterov Yu.V. Redox processes and intensification of metal leaching. Moscow: Publishing House "Ruda i Metally" ("Ore and Metals"), 2009. 543 p. (in Russ.).

11. Zelikman A.N., Korshunov B.G., Elyutin A.V., Zakharov A.M. Niobium and tantalum. Moscow: Metallurgiya Publ., 1990. 296 p. (in Russ.).

12. Chekmarev A.M. Solvometallurgy-perspective direction of metallurgy of rare and non-ferrous metals. Moscow: Atomizdat Publ., 2004. 190 p. (in Russ.).

13. Gromov P.B., Muzhdabaeva M.A., Kopkova E.K., Serba N.V. Extraction of niobium and tantalum at decomposition of the vismutotantalit mineral acids. *Tsvetnye metally* (Non-Ferrous Metals). 2018; (1): 28-33 (in Russ.).

14. Gromov P.B., Drogobuzhskaya S.V., Kopkova E.K., Muzhdabaeva M.A. Leaching of niobium(V) and tantalum(V) from plumbomicrolita non-aqueous-based solvent of monohydric aliphatic alcohols. *Khimicheskaya tekhnologiya* (Chemical Technology). 2015; 16(1): 39-45. (in Russ.).

Об авторах:

Пермякова Наталья Анатольевна, аспирант кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов имени К.А. Большакова Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д.86); младший научный сотрудник технологического отдела ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского (119017, Россия, Москва, пер. Старомонетный, д.31).

Лысакова Елена Иосифовна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры химии и технологии редких и рассеянных элементов, наноразмерных и композиционных материалов имени К.А. Большакова Института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Ануфриева Светлана Ивановна, кандидат химических наук, заведующий технологическим отделом ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского (119017, Россия, Москва, пер. Старомонетный, д. 31).

Лихникевич Елена Германовна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник технологического отдела ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского (119017, Россия, Москва, пер. Старомонетный, д. 31).

About the authors:

Nataliya A. Permyakova, Postgraduate Student, K.A. Bolshakov Chair of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanosized and Composite Materials, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia); Junior Research Assistant of the Technological Department, N.M. Fedorovsky All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources (31, Staromonetny per., Moscow 119017, Russia).

Elena I. Lysakova, Ph.D. (Chem.), Docent, Associate Professor of K.A. Bolshakov Chair of Chemistry and Technology of Rare and Scattered Elements, Nanosized and Composite Materials, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Svetlana I. Anufrieva, Ph.D. (Chem.), Chief of the Technological Department, N.M. Fedorovsky All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources (31, Staromonetny per., Moscow 119017, Russia).

Elena G. Likhnikovich, Ph.D. (Eng.), Leading Researcher of the Technological Department, N.M. Fedorovsky All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources (31, Staromonetny per., Moscow 119017, Russia).