

Научная статья
УДК 66.061.35:546.82:546.882
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.032

ИЗУЧЕНИЕ ЭКСТРАКЦИИ ТИТАНА И НИОБИЯ ИЗ СЕРНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНЫХ ЭКСТРАГЕНТОВ

**Наталья Владимировна Мудрук¹, Инна Владимировна Зиновьева²,
Полина Алексеевна Лодыгина³, Юлия Алексеевна Заходяева⁴, Андрей Алексеевич Вошкин⁵,
Анатолий Иванович Николаев⁶, Светлана Витальевна Дрогобужская⁷**

^{1, 3, 6, 7}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия
^{2, 4, 5}Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова Российской академии наук, Москва, Россия

¹n.mudruk@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1280-5554>

²iz@igic.ras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2428-4621>

³p.lodygina@ksc.ru

⁴yz@igic.ras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5719-2061>

⁵voshkin@igic.ras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7453-9477>

⁶a.nikolaev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9457-7761>

⁷s.drogobuzhskaia@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1699-7584>

Аннотация

Изучена экстракция титана и ниобия из сернокислых растворов, полученных при переработке перовскитового концентрата. Получены данные по распределению элементов при экстракции с использованием ряда бинарных экстрагентов. Показана возможность разделения близких по свойствам титана и ниобия из сернокислых растворов при использовании некоторых бинарных экстрагентов.

Ключевые слова:

титан, ниобий, экстракция, бинарные экстрагенты, перовскит, комплексная переработка

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук № FMEZ-2022-0015.

Для цитирования:

Изучение экстракции титана и ниобия из сернокислых растворов с использованием бинарных экстрагентов / Н. В. Мудрук [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 1. С. 180–187. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.032

Original article

A STUDY ON SOLVENT EXTRACTION OF TITANIUM AND NIOBIUM USING BINARY EXTRACTANTS

**Natalia V. Mudruk¹, Inna V. Zinov'eva², Polina A. Lodygina³, Yulia A. Zakhodyaeva⁴,
Andrey A. Voshkin⁵, Anatoliy I. Nikolaev⁶, Svetlana V. Drogobuzhskaia⁷**

^{1, 3, 6, 7}I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

^{2, 4, 5}Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹n.mudruk@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1280-5554>

²iz@igic.ras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2428-4621>

³p.lodygina@ksc.ru

⁴yz@igic.ras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5719-2061>

⁵voshkin@igic.ras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7453-9477>

⁶a.nikolaev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9457-7761>

⁷s.drogobuzhskaia@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1699-7584>

Abstract

The extraction of titanium and niobium from sulfuric acid solutions obtained after the perovskite concentrate processing has been studied. Extraction has been performed using a number of binary extractants, and distribution data have been estimated. The possibility of separation of titanium and niobium from sulfuric acid solutions has been demonstrated.

Keywords:

titanium, niobium, extraction, binary extractants, perovskite, complex processing

© Мудрук Н. В., Зиновьева И. В., Лодыгина П. А., Заходяева Ю. А.,
Вошкин А. А., Николаев А. И., Дрогобужская С. В., 2023

Acknowledgments:

the article was made with the support of the federal budget on the topic of the state assignment for Tananaev Institute of Chemistry — Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” No FMEZ-2022-0015.

For citation:

A study on solvent extraction of titanium and niobium using binary extractants / N. V. Mudruk [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 180–187. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.032

Введение

Из числа многих методов, применяемых для извлечения и разделения редких элементов, экстракция имеет наибольшее значение в создании технологических схем, эффективных по техническим и экономическим показателям. Помимо прочего экстракционный способ позволяет упростить выделение соединений из сложных по составу растворов, что особенно актуально при переработке нетрадиционного титанового сырья. Экстракция также эффективна при необходимости получать высокочистые соединения и не требует дополнительного оборудования для стадии очистки [1].

Для разработки экстракционных способов получения титана, тантала и ниобия чрезвычайно важно понимание поведения этих элементов в растворах. Тантал и ниобий имеют очень близкие радиусы атомов и ионов, поэтому различия в их химических свойствах невелики, но все же существуют. Ниобий химически более активен, легко восстанавливается в водных растворах, у тантала же эти свойства менее выражены. Существующие различия (большая химическая инертность тантала по сравнению с ниобием) объясняются структурой электронных оболочек. Разница между атомными радиусами ниобия и титана и ионными радиусами Ti^{4+} и Nb^{5+} также очень мала, что обуславливает схожее поведение этих трех элементов в растворах [2]. Химия титана даже в разбавленных растворах оказывается связанной с процессами полимеризации [3]. В растворах титан может находиться в форме простых и комплексных ионов, а также в коллоидно-дисперсном состоянии. Превалирование той или иной формы зависит от условий получения и хранения раствора, его концентрации, содержания примесей и других факторов. В технологии получения соединений титана, тантала и ниобия на первой стадии, как правило, невозможно добиться разделения этих элементов вследствие сильного сходства их химических свойств.

В общемировой практике разделение тантала и ниобия проводят из фторидных растворов этих элементов. Растворимость ниобия, тантала и титана во фторидных растворах значительно выше, чем в растворах других кислот, при этом сами элементы менее склонны к полимеризации. Фторидные растворы устойчивы в широком интервале концентраций металлов и лигандов [1].

Ниобий и тантал в кислых фторидных растворах легко образуют одноосновные кислоты NbF_6 , извлекаемые по гидратно-сольватному механизму нейтральными кислородсодержащими экстрагентами [4, 5]. Именно во фторидных растворах проявляются различия в их свойствах и наиболее легко реализуются условия их разделения методами жидкостной экстракции, большую роль при этом играет концентрация свободной фтороводородной кислоты в технологическом растворе. На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов распределения тантала и ниобия в интервале концентраций фтороводородной кислоты в растворе от 2 до 16 М при экстракции трибутилфосфатом (ТБФ) [1].

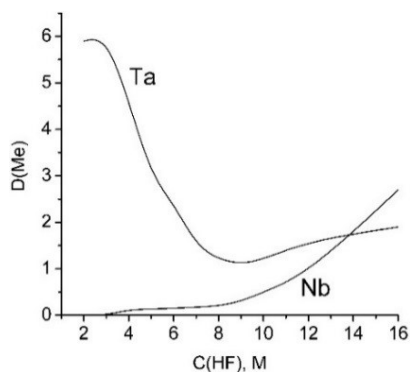


Рис. 1. Зависимости коэффициентов распределения (D) тантала и ниобия от содержания HF

В области концентраций HF до 8 М разделение двух элементов может быть достаточно легко реализуемо. Кроме того, во фторидных растворах растворимость тория и урана — частых спутников редких металлов в сырье — минимальна, и они могут быть отделены в виде фторидного кека [4].

Вследствие всех преимуществ экстракции тантала и ниобия из фторидных растворов данный способ получил очень широкое распространение в технологии переработки традиционного ниобо-танталового сырья — колумбито-танталитов, пирохлора [6–9]. Традиционное сырье для получения тантала и ниобия характеризуется малым набором примесей и высоким содержанием целевых компонентов [10, 11]. Это справедливо и для традиционных титановых концентратов, где содержание титана может достигать > 90 % по TiO₂, а спектр примесных элементов крайне мал. Отличия составов традиционного и нетрадиционного титанового сырья (табл. 1) обуславливают необходимость принципиально различных подходов к их переработке. Наличие большого количества дополнительных компонентов и примесей обуславливает сложность и многостадийность технологических схем, то есть приоритетной задачей становится комплексная переработка концентратов. Особенности состава нетрадиционных концентратов, во-первых, непосредственно влияют на степень рентабельности переработки нетрадиционных титановых руд, а во-вторых, накладывают дополнительные требования на рациональное использование сырья [12].

Таблица 1

Состав титановых концентратов, мас. %

Компонент	Нетрадиционное сырье		Традиционное сырье	
	Лопаритовый концентрат	Перовскитовый концентрат	Ильменитовый концентрат	Рутиловый концентрат
Nb ₂ O ₅	7,93–15,4	0,64–2,50	–	–
Ta ₂ O ₅	0,58–0,92	0,64–2,50		
TiO ₂	36,3–40,1	50,8–56,8	Не менее 54,0	Не менее 94
SiO ₂	0,53–1,27	0,12–1,93	Не более 4,0	Не более 1,5
Ln ₂ O ₃	28,3–34,7	2,18–10,7	–	–
CaO	3,86–4,43	26,3–38,1	–	0,01–0,05
Fe ₂ O ₃	0,20–1,15	0,43–2,00	Не более 30*	Не более 3
Al ₂ O ₃	0,10–0,70	0,15–1,30	Не более 4,0	Не более 0,6

* В пересчете на Fe₂O₃.

Данные по экстракции титана, тантала и ниобия из сернокислых растворов практически не представлены в литературе. Немногочисленные исследования данного вопроса носят скорее поисковый характер и не имеют практического применения [13–15]. Поэтому при получении не содержащих фтор растворов в процессе переработки сырья рекомендуют все же использовать предварительную экстракционную конверсию ниобия и тантала во фторидные комплексы. Но использование фтористоводородной кислоты высоких концентраций создает как проблемы для человека и окружающей среды, так и трудности со специальным оборудованием на производстве. Среди различных водных растворов наиболее реальными для технологии экстракции тантала и ниобия после фторидных растворов можно рассматривать сернокислые, что связано с широким применением серной кислоты в технологии редкометалльного сырья, ее низкой стоимостью и доступностью [1]. Тем не менее, сведения по экстракционному выделению тантала и ниобия из нефторидных модельных и технологических растворов в настоящий момент очень скудны. Это же относится и к проблеме разделения ниобия и тантала методом жидкостной экстракции из растворов, не содержащих фторид-ион.

Очевидно, что для переработки такого нетрадиционного титанового сырья, как перовскит, необходим комплексный подход с получением широкого спектра продуктов и полупродуктов, а также с минимизацией отходов потенциального производства. Одной из важнейших задач реализации схемы такой переработки является задача отделения титана от тантала и ниобия с использованием метода жидкостной экстракции.

В ИХТРЭМС КНЦ РАН разработана схема азотнокислотного вскрытия перовскитового концентрата, которая подразумевает получение гидратного кека (ГК, смесь гидроокисей титана, тантала и ниобия) и растворение его в серной кислоте [16]. Изучение выделения и разделения титана и ниобия из полученных растворов экстракционным способом является одной из актуальных задач для разработки стадии технологической схемы переработки перовскита. Решение проблемы разделения этих элементов на данном этапе позволит получать чистые соединения титана и ниобия. Настоящая работа посвящена изучению экстракции титана и ниобия из сернокислых растворов с использованием ряда экстрагентов с целью определить наиболее эффективные из них, а также подобрать оптимальные условия экстракции для разделения элементов.

Материалы и методы

Экстракцию проводили в полипропиленовых делительных воронках из сернокислых модельных растворов состава: 1 моль/л Ti, 0.01 моль/л Nb, 0.06 моль/л HF и технологического раствора, полученного после растворения ГК (табл. 2).

Таблица 2

Состав технологического раствора

Компонент / Элемент	Содержание, г/л	Компонент / Элемент	Содержание, г/л
H ₂ SO ₄	436,54	Eu	≤ 0,003
F ⁻	0,28	Gd	< 0,020
Fe	3,50	Ho	< 0,005
Ti	51,36	Lu	< 0,005
Nb	1,35	Nd	0,16
Ta	0,059	Pr	0,071
Th	≤ 0,059	Sm	< 0,005
Ce	0,89	Tb	< 0,005
La	0,46	Tm	< 0,005
Dy	< 0,003	Y	≤ 0,005
Er	< 0,006	Yb	< 0,005

Бинарными экстрагентами выступали: триоктиламин (ТОА) + ди-2-этилгексилфосфорная кислота (Д2ЭГФК), ТОА + октановая кислота, ТОА + ди(2,4,4-триметилпентил)-фосфиновая кислота (Cyanex 272), триалкиламин (ТАА, Alamine 336) + Д2ЭГФК, метилтриалкиламмоний хлорид (смесь C₈-C₁₀) (Aliquat 336) + Д2ЭГФК. В качестве разбавителя использовали толуол. Содержание бинарного экстрагента в толуоле составляло 0,5 М. Влияние серной кислоты на экстракцию элементов изучали в диапазоне от 1,2 до 8,0 моль/л. Соотношение объемов фаз $V_o : V_v$ для изучения степени извлечения элементов из растворов с различным содержанием серной кислоты было выбрано 1 : 1. Изучение влияния соотношения объемов фаз на экстракцию титана и ниобия из растворов с концентрацией серной кислоты 4 М проводили в диапазоне $V_o : V_v = 0.5 : 2$: 1. Время перемешивания составляло 20 мин, время расслаивания фаз — 1 ч.

Содержание элементов в водных растворах определяли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) с динамической реакционной системой ELAN 9000 DRC-е с системами лазерного испарения, микроволнового разложения, очистки воды и кислот (PerkinElmer, США).

Результаты

Ранее [17] нами была изучена экстракция титана и ниобия нейтральными кислородсодержащими экстрагентами. Извлечение титана и ниобия при экстракции октанолом-1 (ОКЛ-1) и ТБФ составило не менее 84 % во всем рассмотренном диапазоне концентраций серной кислоты 1,2–8,0 М. Было показано, что увеличение соотношения объема фаз $V_o : V_v$ незначительно влияет на степени экстракции титана и ниобия как для ОКЛ-1, так и для ТБФ. Снижение соотношения $V_o : V_v$ влияет заметнее — понижает извлечение ниобия и особенно титана. На рис. 2. приведены зависимости коэффициентов распределения (D) титана и ниобия при экстракции ОКЛ-1 и ТБФ. По расчетам при полученных значениях экстракции оба элемента могут быть извлечены количественно (> 99,99 %) за 2 ступени. Можно утверждать, что из растворов с широким диапазоном концентраций серной кислоты можно коллективно извлекать титан и ниобий нейтральными кислородсодержащими экстрагентами.

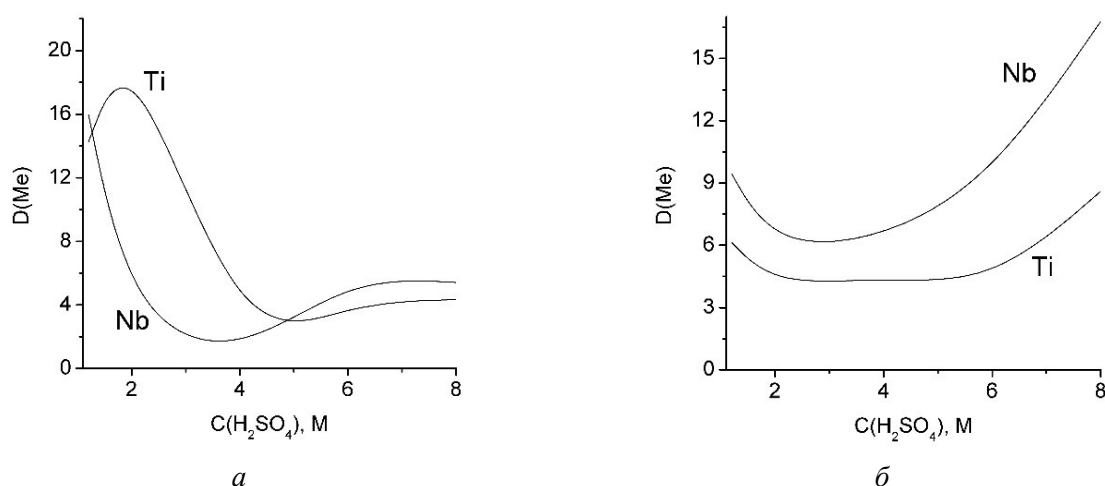


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения (D) титана и ниобия от содержания серной кислоты в растворе при экстракции ОКЛ-1 (a) и ТБФ (b)

Рассчитанные значения коэффициентов разделения β элементов при экстракции нейтральными кислородсодержащими экстрагентами показали, что в данных условиях разделить титан и ниобий не представляется возможным. Для решения поставленной задачи изучили экстракцию титана и ниобия из сернокислого технологического раствора с применением бинарных экстрагентов — смесей органических кислот и органических оснований, которые в определенных условиях образуют термодинамически устойчивые ионные пары, состоящие из органических катионов и органических анионов. Бинарные экстрагенты успешно применяются для извлечения из растворов комплексов со смешанными лигандами и позволяют более эффективно решать проблемы разделения элементов [18].

В таблице 3 приведены коэффициенты распределения титана и ниобия и коэффициенты разделения элементов при экстракции различными бинарными экстрагентами из технологического раствора после растворения ГК.

Таблица 3

Экстракционные показатели извлечения титана и ниобия из сернокислых растворов с использованием бинарных экстрагентов

Бинарный экстрагент	Элемент	Коэффициент распределения элемента D	Коэффициент разделения элементов β
ТОА + Д2ЭГФК	Ti	0,21	57,70
	Nb	11,90	
ТОА + октановая кислота	Ti	0,08	5,002
	Nb	0,42	
ТОА + Cyanex 272	Ti	1,08	5,62
	Nb	6,07	
Alamine 336 + Д2ЭГФК	Ti	0,33	24,76
	Nb	8,17	
Aliquat 336 + Д2ЭГФК	Ti	17,06	0,25
	Nb	4,29	

На рисунке 3 показана зависимость степеней извлечения элементов (E) от соотношения объема фаз $V_o : V_v$ при экстракции бинарным экстрагентом ТОА + Д2ЭГФК.

Результаты экспериментов показали, что при экстракции бинарными экстрагентами на основе аминов и Д2ЭГФК можно достичь разделения титана и ниобия из описываемого технологического раствора с содержанием серной кислоты 4 М. Хотя хорошее разделение достигается во всем изученном диапазоне соотношения объема фаз, для разделения элементов многоступенчатой экстракцией можно

рекомендовать выбор соотношения $V_o : V_b = 0,5 \div 0,7 : 1$. Это позволит снизить поток экстрагента при сохранении достаточно высокой степени извлечения ниобия. Число ступеней экстракции можно рассчитать по формуле Крэмсера:

$$\varphi = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon^{n+1} - 1},$$

где φ — выход компонента в рафинат, %; n — число ступеней на каскаде; $\varepsilon = \frac{y}{100-y}$ — неэкстрагированная часть вещества; y — извлечение на одной ступени каскада, %. При полученных значениях экстракции и $\varphi = 0,01$ % ниобий может быть извлечен количественно ($> 99,99$ %) за 5 ступеней экстракции.

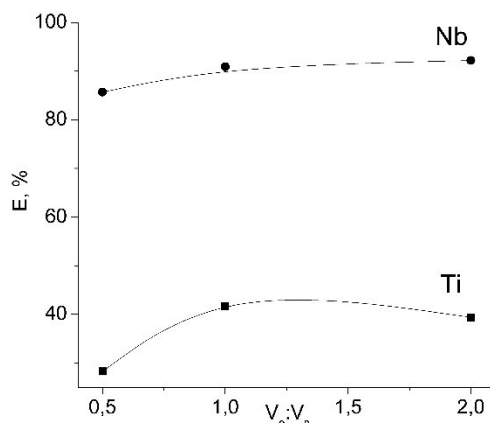


Рис. 3. Зависимость степеней извлечения титана и ниобия (E) при экстракции ТОА + Д2ЭГФК от соотношения объема фаз $V_o : V_b$

Выводы

Изучена экстракция титана и ниобия из сернокислых растворов с помощью бинарных экстрагентов. Проведена оценка возможности разделения элементов при экстракции из сернокислого технологического раствора после разложения гидратного кека, полученного при переработке перовскитового концентрата, серной кислотой. Эксперименты позволили выбрать наиболее эффективные бинарные смеси — смеси аминов и ди-2-этилгексилфосфорной кислоты, которые являются доступными промышленными экстрагентами.

Список источников

1. Бабкин А. Г., Майоров В. Г., Николаев А. И. Экстракция ниобия и тантала и других элементов из фторидных растворов. Л.: Наука, 1988. 204 с.
2. Гибало И. М. Аналитическая химия элементов. Ниобий и тантал. 1967. 352 с.
3. Лучинский Г. П. Химия титана. М.: Издательство «Химия», 1971. 471 с.
4. Майоров В. Г., Николаев А. И. Экстракция тантала и ниобия октанолом с получением пентаоксидов высокой чистоты // Цветные металлы. 2002. Т. 7. С. 62–65.
5. Maiorov V. G. et al. Extraction of antimony and niobium with tributyl phosphate from fluoride-ammonium solutions // Theor. Found. Chem. Eng. 2016. Vol. 50, № 5. P. 781–784.
6. Kabangu M. J., Crouse P. L. Separation of niobium and tantalum from Mozambican tantalite by ammonium bifluoride digestion and octanol solvent extraction // Hydrometallurgy. Elsevier B. V., 2012. Vol. 129–130. P. 151–155.
7. Mayorov V. G., Nikolaev A. I. Solvent extraction of niobium(V) and tantalum(V) from fluorometallate acid solutions // Hydrometallurgy. 1996. Vol. 41, № 1. P. 71–78.
8. Dutta S. et al. Process development for the separation of niobium and tantalum from fluoride medium using trioctyl amine and application of Taguchi's method to optimize solvent extraction parameters // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 199. № 105522.
9. Masloboeva S. M. et al. Separation and purification of tantalum from plumbomicrolite of amazonite deposit in Kola Peninsula by acid leaching and solvent extraction // J. Cent. South Univ. 2021. Vol. 28, № 1. P. 72–88.

10. Калинин В. Т., Николаев А. И. Особенности сырьевой базы Кольского полуострова для производства титановой и редкометалльной продукции // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке. М.: ВИМС, 2000. Т. 1. С. 77–85.
11. Николаев А. И. и др. Перовскитовый концентрат — перспективное нетрадиционное сырье для производства титановой и редкометалльной продукции // Комплексное использование минерального сырья (КИМС). 2015. Т. 2. С. 26–34.
12. Мудрук Н. В. и др. Изучение кинетики кислотного разложения нетрадиционного титанового сырья Арктической Зоны Российской Федерации // Арктика экология и экономика. 2023. Т. 13, № 1. С. 41–54.
13. Kinsman L. M. M. et al. Tantalum recycling by solvent extraction: Chloride is better than fluoride // *Metals* (Basel). 2020. Vol. 10, № 3. P. 1–9.
14. Sun L. et al. A novel method for the separation of niobium and titanium from sulfuric acid-oxalate solutions using N235 and MIBK // *Hydrometallurgy*. Elsevier B. V. 2021. Vol. 205, № 1. P. 105748.
15. Micheau C. et al. Recovery of tantalum from synthetic sulfuric leach solutions by solvent extraction with phosphonate functionalized ionic liquids // *Hydrometallurgy*. Elsevier, 2019. Vol. 189, July. P. 105107.
16. Герасимова Л. Г., Николаев А. И., Петров В. Б., Бычяня Ю. Г. Азотнокислотное разложение перовскита в присутствии фторсодержащего реагента // Цветные металлы. 2017. Т. 5. С. 50–53.
17. Мудрук Н. В. и др. Изучение экстракции титана и ниобия нейтральными экстрагентами из сернокислых растворов // Сборник тезисов II Международной научно-практической конференции «Редкие металлы и материалы на их основе технологии, свойства и применение». 2022. С. 286–288.
18. Холькин А. И., Белова В. В., Вошкин А. А. Бинарная экстракция. Теория и применение. М.: Техносфера, 2021. 354 с.

References

1. Babkin A. G., Majorov V. G., Nikolaev A. I. *Ekstrakciya niobiya i tantala i drugih elementov iz fluoridnyh rastvorov* [Extraction of niobium and tantalum and other elements from fluoride solutions] Leningrad, Nauka, 1988, 204 p. (In Russ.).
2. Gibalo I. M. *Analiticheskaya himiya elementov. Niobij i tantal* [Analytical chemistry of elements. Niobium and tantalum], 1967, 352 p. (In Russ.).
3. Luchinskij G. P. *Himiya titana* [Titanium Chemistry]. Moscow, Izdatel'stvo "Himiya," 1971, 471 p. (In Russ.).
4. Majorov V. G., Nikolaev A. I. Ekstrakciya tantala i niobiya oktanolom s polucheniem pentaoksidov vysokoj chistoty [Extraction of tantalum and niobium with octanol to obtain high purity pentoxides] *Cvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2002, vol. 7, pp. 62–65. (In Russ.).
5. Majorov V. G. et al. Extraction of antimony and niobium with tributyl phosphate from fluoride-ammonium solutions. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 781–784.
6. Kabangu M. J., Crouse P. L. Separation of niobium and tantalum from Mozambican tantalite by ammonium bifluoride digestion and octanol solvent extraction. *Hydrometallurgy*. Elsevier B. V., 2012, vol. 129–130, pp. 151–155.
7. Mayorov V. G., Nikolaev A. I. Solvent extraction of niobium(V) and tantalum(V) from fluorometallate acid solutions. *Hydrometallurgy*, 1996, vol. 41, no 1, pp. 71–78.
8. Dutta S. et al. Process development for the separation of niobium and tantalum from fluoride medium using trioctyl amine and application of Taguchi's method to optimize solvent extraction parameters. *Hydrometallurgy*, 2021, vol. 199, no 105522.
9. Masloboeva S. M. et al. Separation and purification of tantalum from plumbomicrolite of amazonite deposit in Kola Peninsula by acid leaching and solvent extraction. *J. Cent. South Univ*, 2021, vol. 28, no 1, pp. 72–88.
10. Kalinnikov V. T., Nikolaev A. I. Osobennosti syr'evoy bazy Kol'skogo poluostrova dlya proizvodstva titanovoj i redkometall'noj produkcii [Features of the raw material base of the Kola Peninsula for the production of titanium and rare metal products]. *Strategiya ispol'zovaniya i razvitiya mineral'no-syr'evoy bazy redkih metallov Rossii v XXI veke* [Strategy for the use and development of the mineral resource base of rare metals in Russia in the 21st century], Moscow, VIMS, 2000, vol. 1, pp. 77–85. (In Russ.).
11. Nikolaev A. I. etc. Perovskitovyj koncentrat — perspektivnoe netradicionnoe syr'e dlya proizvodstva titanovoj i redkometall'noj produkcii [Perovskite concentrate is a promising non-traditional raw material for the production of titanium and rare metal products]. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya (KIMS)* [Integrated use of mineral raw materials], 2015, vol. 2, pp. 26–34. (In Russ.).
12. Mudruk N. V. etc. Izuchenie kinetiki kislotnogo razlozheniya netradicionnogo titanovogo syr'ya Arkticheskoy Zony Rossijskoj Federacii [Study of the kinetics of acid decomposition of non-traditional titanium raw materials in the Arctic Zone of the Russian Federation]. *Arktika ekologiya i ekonomika* [Arctic ecology and economy], 2023, vol. 13, no 1, pp. 41–54. (In Russ.).

13. Kinsman L. M. M. et al. Tantalum recycling by solvent extraction: Chloride is better than fluoride. *Metals (Basel)*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 1–9.
14. Sun L. et al. A novel method for the separation of niobium and titanium from sulfuric acid-oxalate solutions using N235 and MIBK. *Hydrometallurgy. Elsevier B. V.*, 2021, vol. 205, no 1, p. 105748.
15. Micheau C. et al. Recovery of tantalum from synthetic sulfuric leach solutions by solvent extraction with phosphonate functionalized ionic liquids. *Hydrometallurgy. Elsevier*, 2019, vol. 189, July, p. 105107.
16. Gerasimova L. G., Nikolaev A. I., Petrov V. B., Bychenya YU. G. Azotnokislotoe razlozhenie perovskita v prisutstvii ftorsoderzhashchego reagent [Nitric Acid Decomposition of Perovskite in the Presence of a Fluorine-Containing Reagent]. *Cvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2017, vol. 5, pp. 50–53. (In Russ.).
17. Mudruk N. V. etc. Izuchenie ekstrakcii titana i niobiya nejtral'nymi ekstragentami iz sernokislyh rastvorov [Study of the extraction of titanium and niobium with neutral extractants from sulfuric acid solutions]. *Sbornik tezisov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Redkie metally i materialy na ih osnove tekhnologii, svoystva i primenenie"* [Collection of abstracts of the II International scientific-practical conference "Rare metals and materials based on them technologies, properties and applications"], 2022, pp. 286–288. (In Russ.).
18. Hol'kin A. I., Belova V. V., Voshkin A. A. *Binarnaya ekstrakciya. Teoriya i primenenie* [Binary extraction. Theory and application]. Moscow, Tekhnosfera, 2021, 354 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Н. В. Мудрук — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
И. В. Зиновьева — кандидат химических наук, младший научный сотрудник;
П. А. Лодыгина — аспирант, инженер;
Ю. А. Заходяева — кандидат химических наук, старший научный сотрудник;
А. А. Вошкин — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией;
А. И. Николаев — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией;
С. В. Дрогобужская — кандидат химических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

N. V. Mudruk — Ph.D., Senior Researcher;
I. V. Zinov'eva — Ph.D., Junior Researcher;
P. A. Lodygina — Postgraduate Student, Engineer;
Y. A. Zakhodyaeva — Ph.D., Senior Researcher;
A. A. Voshkin — Dr. Sci., Corresponding Member of RAS, Head of the Laboratory;
A. I. Nikolaev — Dr. Sci., Corresponding Member of RAS, Head of the Laboratory;
S. V. Drogobuzhskaya — Ph.D., Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 09.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 14.02.2023.
The article was submitted 09.02.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 14.02.2023.