

Научная статья
УДК 66.081:669.296
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.026

О ПЕРЕРАБОТКЕ ЛОВОЗЕРСКОГО ЭВДИАЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА МЕТОДОМ СОРБЦИОННОЙ КОНВЕРСИИ

**Эфроим Пинхусович Локшин¹, Ольга Альбертовна Тареева²,
Светлана Витальевна Дрогобужская³**

^{1, 2, 3}*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия*

¹*Lokshin.ep@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0465-8021>*

²*o.tareeva@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8932-7581>*

³*s.drogobuzhskaia@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1699-7584>*

Аннотация

Обобщены результаты исследований по разработке научных основ комплексной технологии переработки ловозерского эвдиалитового концентрата. Сообщается об особенностях состава концентрата. Изучены закономерности его разложения методом сорбционной конверсии низко концентрированными растворами минеральных кислот, десорбции металлов из сульфокатионита, ступенчатого гидролитического осаждения из элюатов концентратов редких элементов, использования перешедшей в растворы кремнекислоты с одновременной рециркуляцией кислотных растворов. Намечены контуры технологии комплексной переработки эвдиалитового концентрата, предусматривающей получение концентратов редких металлов и использование основной части содержащихся в концентрате кремнезёма и щелочных металлов.

Ключевые слова:

эвдиалитовый концентрат, гидрометаллургическая переработка, сорбционная конверсия

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-2022-5.

Государственное задание по теме научно-исследовательской работы № FMEZ-2022-5.

Для цитирования:

Локшин Э. П., Тареева О. А., Дрогобужская С. В. О переработке ловозерского эвдиалитового концентрата методом сорбционной конверсии // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 1. С. 144–149. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.026

Original article

ON THE PROCESSING OF LOVOZERSKY EUDIALYTE CONCENTRATE BY SORPTION CONVERSION

Efroim P. Lokshin¹, Olga A. Tareeva², Svetlana V. Drogobuzhskaya³

^{1, 2, 3}*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*

¹*Lokshin.ep@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0465-8021>*

²*o.tareeva@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8932-7581>*

³*s.drogobuzhskaia@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1699-7584>*

Abstract

The results of research on the development of the scientific foundations of the complex technology of processing Lovozersky eudialyte concentrate are summarized. The features of the concentrate composition are reported. The regularities of concentrate decomposition by sorption conversion with low-concentration solutions of mineral acids, desorption of metals from sulfocationite, stepwise hydrolytic deposition from eluates of concentrates of rare elements, the use of silicic acid transferred to solutions with simultaneous recirculation of acid solutions were studied. The outlines of the technology of complex processing of eudialyte concentrate are outlined, which provides for the production of concentrates of rare metals and the use of the main part of the silica and alkali metals contained in the concentrate.

Keywords:

eudialyte concentrat, hydrometallurgical processing, sorption conversion

Acknowledgments:

the work is carried out within the topic of 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 state assignment No. FMEZ-2022-5 and supported by the federal budget.
State assignment research topic No. FMEZ-2022-5.

For citation:

Lokshin E. P., Tareeva O. A., Drogobuzhskaya S. V. On the processing of Iovozersky eudialyte concentrate by sorption conversion // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 144–149. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.1.026

Введение

Использованы обозначения: C_A — концентрация вещества А; РЗЭ — редкоземельные элементы; $\sum \text{Tr}_2\text{O}_3$ — сумма оксидов редкоземельных элементов(III); Ж : Т — отношение объёма жидкой фазы (см^3) к массе твёрдого (г); α — расход кислоты от стехиометрически необходимого (отн. %); β — расход сорбента от стехиометрически необходимого для сорбции катионов Me^{n+} , а титана в виде Ti^{2+} (отн. %); γ — степень заполнения сорбционной обменной ёмкости сульфокатионита КУ-2-8чС (ГОСТ 20298–74) (%); t — температура ($^{\circ}\text{C}$); $\Delta m = 100 \cdot (m - m_1) / m$ (%), где m и m_1 соответственно массы исходной загрузки и твёрдого остатка; $A_{\text{эфф}}$ — удельная эффективная радиоактивность, $\text{КБк} \cdot \text{кг}^{-1}$; Н. а. — не анализировали.

Хотя эвдиалит привлекает внимание прежде всего содержащимся в нём цирконием (табл. 1), в последние годы интерес к эвдиалитовым месторождениям резко возрос из-за заметных концентраций в эвдиалите РЗЭ, сумма которых обогащена иттрием и лантаноидами средней и тяжелой групп (табл. 2).

Таблица 1

Составы эвдиалитовых концентратов различных месторождений [1]

Концентрат	C, мас. %								
	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	SrO	Al ₂ O ₃	$\sum \text{Tr}_2\text{O}_3$	TiO ₂	SiO ₂
1	12,96	1,32	0,98	3,95	2,02	3,69	1,85	2,06	41,83
2	13,29	0,96	0,03	7,98	Н. а.	6,04	1,87	0,35	49,5
3	12	1	Н. а.	2	Н. а.	9	1,65	Н. а.	50
	Fe ₂ O ₃	MnO	ZrO ₂	HfO ₂	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	ThO ₂	UO ₂	
1	3,95	1,96	9,32	0,25	0,61	0,03	0,010	0,009	
2	8,63	0,39	8,73	Н. а.	0,09	Н. а.	Н. а.	Н. а.	
3	14	Н. а.	3	Н. а.	Н. а.	Н. а.	$13 \cdot 10^{-4}$	$17 \cdot 10^{-4}$	

Примечание. 1 — Аллуайв (Россия); 2 — Tanbreez (Гренландия) [2]; 3 — Norra Kärr (Швеция) [3].

$A_{\text{эфф}}$ российского эвдиалитового концентрата $\approx 1,2 \text{ КБк} \cdot \text{кг}^{-1}$, то есть он относится к продуктам II класса с повышенным содержанием природных радионуклидов [4]. Концентрат шведского месторождения не радиоактивен, но содержание природных радионуклидов относительно $\sum \text{Tr}_2\text{O}_3$ в нём велико и может приводить к получению радиоактивной редкоземельной продукции.

Таблица 2

Соотношение РЗЭ в эвдиалитовых концентратах различных месторождений

Концентрат	C, мас. %							
	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
1	22,09	14,33	27,36	3,18	13,03	3,81	1,11	3,95
2	17,16	18,34	32,72	3,75	13,03	2,65	2,17	2,63
3	32	11	22	3	12	3	—	4
	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\sum \text{Tr}$
1	0,72	4,14	0,84	2,58	0,33	2,25	0,28	100
2	0,48	3,30	0,73	0,24	0,36	2,15	0,30	100
3	—	6	—	4	—	3	—	100

Из данных таблиц 1 и 2 следует, что российский эвдиалитовый концентрат по качеству не уступает зарубежным материалам.

Переработка эвдиалитового концентрата является сложной технической задачей, поскольку он является полиметаллическим и суммарное содержание редких металлов в нём не очень велико. Предлагаемые гидрометаллургические технологии предусматривают большой расход минеральных кислот и использование только редких металлов. Следствием этого является образование большого количества жидких и твёрдых отходов, реальные методы утилизации которых не разрабатывались.

Целью исследований являлась разработка научных основ свободной от указанных недостатков технологии переработки эвдиалитового концентрата, полученного из руды месторождения Аллуайв (Ловозерский район Мурманской области).

Экспериментальная часть

Регламентирующие качество эвдиалитового концентрата нормативные документы пока не созданы. Химический состав произведённой на Ловозёрском ГОКе промышленной партии эвдиалитового концентрата приведён в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав эвдиалитового концентрата

C, мас. %								
Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	SrO	BaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
12,96	1,32	0,98	3,95	2,02	0,17	3,69	3,95	41,83
TiO ₂	MnO	ΣTr ₂ O ₃	ZrO ₂	HfO ₂	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	ThO ₂	UO ₂
2,06	1,96	1,85	9,32	0,25	0,61	0,03	0,010	0,009

Гранулометрический состав концентрата: фракция + 0,4 мм — 10 мас. %, фракция +0,2–0,4 мм — 40 мас. %, фракция -0,2 мм — 50 мас. %. По нашим данным, концентрат содержит минералы (мас. %): 77,7 эвдиалита, 1,05 лопарита, 6,9 нефелина и альбита, 4,4 лампрофиллита, 2,8 эгирина.

$A_{эфф.}$ исследованной партии эвдиалитового концентрата равнялась 1,2 КБк·кг⁻¹, то есть он относится к II классу материалов с природными радионуклидами [4]. Большая часть $A_{эфф.}$ определяется ураном, хотя вклад тория также существенен.

В концентрате содержание циркония, иттрия и РЗЭ иттриевой группы в основном определяется эвдиалитом, ниобия — эвдиалитом и лопаритом, тория — эвдиалитом и лопаритом, титана — лампрофиллитом, эвдиалитом и лопаритом (табл. 4). Значительная часть РЗЭ цериевой группы входит в состав лопарита.

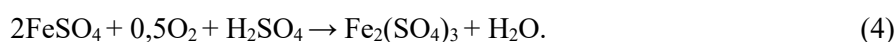
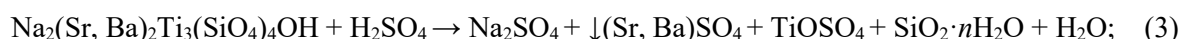
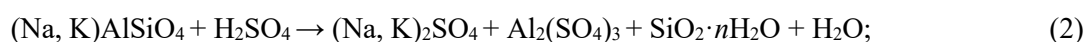
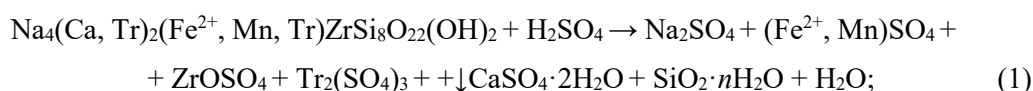
Таблица 4

Распределение редких элементов между основными редкометалльными минералами эвдиалитового концентрата

Минерал	Распределение, отн. %			
	Zr	Σ Tr	Nb	Ti
Эвдиалит	99,85	88,2	78,6	26,2
Лопарит	0,01	11,5	20,2	14,4
Лампрофиллит	0,14	0,3	1,2	59,4

Исследовано разложение концентрата растворами 1,5–3 мас. % серной (ГОСТ 4204–77) и азотной (ГОСТ 4461–77), 1,14–1,4 мас. % соляной (ГОСТ 3118–77) кислот при условиях: Ж : Т = 5÷35, α = 13÷136 %, β = 69÷115 %, t = 20÷100 °C, продолжительность 4÷12 ч.

Эвдиалит, нефелин и лампрофиллит могли разлагаться серной кислотой по реакциям:



Сходным образом проходит взаимодействие этих минералов с азотной и соляной кислотами. Альбит, эгирин и лопарит не разлагались.

Разложение эвдиалитового концентрата методом сорбционной конверсии низко концентрированными кислотными растворами является сложным, многофакторным процессом. В ходе его постоянно меняется состав жидкой фазы: накапливается кремнекислота, снижается кислотность из-за постепенного накопления металлов, главным образом натрия. Концентрация кремнекислоты в растворах в пересчёте на SiO_2 не превышала $16,76 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$. Поэтому, если пренебречь кремнезёмом полевых шпатов и эгирина, полное разложение силикатных минералов возможно при $J : T \geq 418,3 : 16,76 = 25$ (здесь 418,3 — масса в граммах содержащегося в 1 кг SiO_2).

При низких значениях $J : T$ после насыщения жидкой фазы кремнекислотой растворение части эвдиалита невозможно, однако выщелачивание металлов из эвдиалита продолжается по диффузионному механизму. В зависимости, главным образом, от величины $J : T$ полученная жидкая фаза представляла собой либо кремнезоль, либо смесь кремнезоля и кремнегеля, либо в основном кремнегель. В свою очередь, кремнегель образовывался двумя путями: либо полимеризацией перешедшей в раствор кремнекислоты, либо как продукт диффузионного выщелачивания металлов из кремнезёмных матриц эвдиалита, нефелина и лампрофиллита. Величина Δm зависела от вида и концентрации кислоты, $J : T$, t и продолжительности процесса и могла достигать 84–89,6 %.

В отличие от существующих представлений [5], из низко концентрированных кислотных растворов сульфокатионитом ниобий сорбируется достаточно эффективно.

Используемые в процессе сорбционной конверсии растворы имеют низкую кислотность. Поэтому катионы металлов III–V групп Периодической системы гидролизуются и в результате реакций оляции — оксоляции могут образовывать полимеры с кремнекислотой. Эти полимеры существуют не только в кремнегелях, но и в кремнезольях.

Сорбция катионов металлов из кислотных растворов исследовавшихся концентраций проходит достаточно эффективно. Из образовавшихся полимеров с кремнекислотой они не сорбируются. Ещё одной причиной снижения эффективности поглощения некоторых металлов является образование ими собственных несорбируемых полимеров, например тетрамеров циркония в сульфатных растворах [6].

Стойкость к гидролизу комплексов циркония, гафния, ниобия, тантала зависит от вида входящих в их состав лигандов, уменьшаясь в ряду $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$. Поэтому при сопоставимой кислотности поглощение сорбентом, например циркония, при использовании солянокислых растворов несколько меньше ($\leq 80,9 \%$), чем при использовании серно- и азотнокислых растворов, где в оптимальных условиях оно достигало 85,1–85,8 %.

Максимальное извлечение циркония в сорбент достигалось при 10-часовом взаимодействии концентрата с кислотными растворами в следующих условиях: 1) 2 мас. % H_2SO_4 , температура 80°C , $J : T = 15$, $\alpha = 39 \%$, $\beta = 115 \%$ (опыт 14); 2) 2 мас. % HNO_3 , температура 60°C , $J : T = 15$, $\alpha = 33 \%$, $\beta = 115 \%$ (опыт 25); 3) 2 мас. % HNO_3 , температура 80°C , $J : T = 35$, $\alpha = 77 \%$, $\beta = 115 \%$ (опыт 30).

При этом извлечение в сорбент составляло соответственно циркония 85,1, 84,2 и 85,8 %, РЗЭ 85,3, 80,4 и 80,3 %, ниобия 24,0, 38,4 и 44,8 %. При оценке результатов следует учитывать (см. табл. 4), что значительная часть РЗЭ (11,5 %) и ниобия (20,2 %) входит в состав неразлагающегося лопарита. Поэтому извлечение иттрия и лантаноидов средней и тяжёлых групп (до 95,8 %) больше извлечения лантаноидов цериевой группы ($\leq 82,4 \%$ лантана и церия, $\leq 83,5 \%$ празеодима). Итак, при сернокислотном процессе достигнуто несколько более высокое извлечение РЗЭ, но значительно уменьшилось извлечение ниобия. Вероятно, это определяется образованием в сульфатных растворах полиядерных комплексов ниобия и титана [7]. Высокое извлечение в сорбент ниобия достигалось в сернокислотном процессе, но в условиях, при которых значительно уменьшалось извлечение циркония.

Таким образом, высокая степень разложения эвдиалита не гарантирует высокое извлечение в сорбент металлов IV–V групп, так как полимеризация кремнекислоты в жидкой фазе сопровождается химическим связыванием склонных к гидролизу выщелоченных металлов. Максимальное извлечение в сорбент циркония и ниобия достигается в разных условиях, так как они имеют разную устойчивость к гидролизу, определяющему образование несорбируемых полимеров с кремнекислотой. Степень гидролиза и, как следствие, образование металлами полимеров с кремнекислотой зависят от кислотности раствора, температуры процесса, порядка введения реагентов. Извлечение в сорбент РЗЭ эвдиалита высоко. Основные потери РЗЭ определяются невозможностью их извлечения из лопарита. Содержание лопарита в твёрдом остатке возрастает до ≥ 5 мас. %, поэтому его выделение из остатка может представлять интерес. Эффективное извлечение в сорбент из разлагающихся минералов урана и тория проходит в широком интервале параметров.

Типичное содержание металлов в сорбентах ($\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$): 9,6–12,6 Na_2O , 1,04–1,85 K_2O , 1,26–1,47 MgO , 3,98–5,18 CaO , 2,36–3,04 SrO , 2,32–2,73 MnO , 4,04–4,73 Al_2O_3 , 3,64–4,53 Fe_2O_3 , 2,21–2,68 $\sum \text{Tr}_2\text{O}_3$, 1,17–1,54 TiO_2 , 9,06–9,28 ZrO_2 , 0,25–0,29 HfO_2 , 0,14–0,2 Nb_2O_5 , 0,005–0,01 Ta_2O_5 , 0,008–0,012 ThO_2 , 0,011–0,013 UO_2 . Степень заполнения функциональных групп при допущении, что металлы сорбировались в виде катионов Me^{n+} , составляла 86–87,8 %. У сорбентов $A_{\text{эф}}$ не превышала $0,21 \text{ КБк} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Извлечение металлов из сорбентов достигалось двухстадийной десорбцией: сначала раствором 5 М NaCl с получением элюата, в который попадают основные количества щелочноземельных и редкоземельных металлов, алюминия, титана, марганца и железа, затем раствором 1 М щавелевой кислоты с получением элюата, содержавшего основные количества циркония (гафния) и ниобия. Из элюата на основе 5 М раствора NaCl нейтрализацией гидроксидом или карбонатом натрия до $\text{pH} = 4$ осаждают примесный кек, содержащий основную часть железа и десорбированных радионуклидов и значительную часть алюминия и титана, затем при $\text{pH} = 7,5$ РЗЭ и, наконец, при $\text{pH} \geq 10$ щелочноземельные элементы и марганец. Из элюата на основе 1 М раствора $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ нейтрализацией гидроксидом или карбонатом натрия до $\text{pH} = 10$ осаждаются совместно цирконий и ниобий. Из этого осадка цирконий может быть избирательно выщелочен раствором соды.

Редкоземельные нерадиоактивные ($A_{\text{эф}} \leq 0,025 \text{ КБк} \cdot \text{кг}^{-1}$) концентраты содержали (мас. %): 50–53,9 $\sum \text{Tr}_2\text{O}_3$, 42,6–45,8 Al_2O_3 , 2,7–2,8 Fe_2O_3 , 0,45–0,5 $\text{MgO} + \text{CaO} + \text{SrO}$, 0,4–1,0 TiO_2 , 0,0004–0,0008 ThO_2 . В растворе на основе нитрата циркония найдено ($\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$): 4770 ZrO_2 , 45,6 HfO_2 , 32 $\text{MgO} + \text{CaO} + \text{SrO}$, 4,0 $\sum \text{Tr}_2\text{O}_3$, 153,7 TiO_2 , 238,5 Al_2O_3 , 143,3 Fe_2O_3 , $\leq 20 \text{ Nb}_2\text{O}_5$, 0,44 ThO_2 , 0,34 UO_2 . Получение нерадиоактивных соединений циркония из такого раствора не проблематично, так как содержание радионуклидов относительно циркония малы. Основной примесью в осадке гидроксида ниобия был натрий.

Для утилизации образующихся кремнезелей исследованы два подхода: концентрирование кремнезёма амораживанием кремнезоля и последующим размораживанием; использование содержащегося в кремнезоле кремнезёма для синтеза волластонита. В первом случае кремнезоль распадается на обогащённый кремнекислотой кремнегель и обеднённый кремнекислотой кислотный раствор. Кислотный раствор после укрепления пригоден для проведения сорбционной конверсии эвдиалитового концентрата, так как оставшимися в нём металлами кислота нейтрализована лишь на $\leq 12\text{--}15\%$. Получающийся кремнегель оказался перспективным сырьём для производства высокоэффективных теплоизоляционных пеносиликатных материалов [8].

По второму варианту сначала из полученного в азотнокислотном процессе кремнезоля дозированным количеством сульфокатионита частично извлекали цирконий и ниобий, при этом натрий количественно оставался в жидкой фазе. Затем в кремнезоль вводили CaCO_3 в количестве, стехиометрически необходимом для синтеза CaSiO_3 . Полученный раствор нейтрализовали содой до $\text{pH} 6$, нагревали 2 ч при 80°C и постоянном перемешивании. Образовавшийся осадок отфильтровали. Прокалкой осадка при 800°C был получен волластонит.

Из нейтрализованного содой раствора натрий сорбируют сульфокатионитом с получением кислотного раствора, годного для повторного использования в процессе сорбционной конверсии эвдиалитового концентрата. Сорбент регенерируют кислотной обработкой из Na^+ - в H^+ -форму, а из полученного раствора электролизом получают гидроксид натрия и кислоту [9].

Выводы

1. Предложены и обоснованы контуры технологии переработки эвдиалитового концентрата, включающей: разложение концентрата методом сорбционной конверсии с получением и разделением насыщенного металлами сульфокатионита, содержащего кремнезём кислотного раствора (кремнезоля) и твёрдого остатка не разлагающихся в процессе минералов; двухстадийную десорбцию металлов сначала раствором 5 М NaCl , затем раствором 1 М щавелевой кислоты; получение из элюатов нерадиоактивных концентратов РЗЭ, циркония (гафния) и ниобия; использование для получения товарной продукции значительной части содержащихся в эвдиалитовом концентрате кремнезёма и щелочных металлов; регенерацию кислотных растворов.

2. В технологии повышена комплексность использования эвдиалитового концентрата, резко снижен расход реагентов, исключено образование жидких и минимизировано количество твёрдых отходов.

Список источников

1. Локшин Э. П., Елизарова И. Р., Рыскина М. П., Тареева О. А. О составе эвдиалитового концентрата // Цветные металлы. 2018. № 2. С. 1–14.
2. Ma Y., Stopic S., Friedrich B. Hydrometallurgical treatment of a Eudialyte concentrate for preparation of rare earth carbonate. *Johnson Matthey Tech.* 2019. V. 63, N 1. P. 2–13.
3. Davis P., Stopic S., Balomenos E., Panias D., Paspaliaris I., Friedrich B. Leaching of rare earth elements from Eudialyte concentrate by suppressing silicon dissolution // *Minerals Engineering*. 2017. V. 108. P. 115–122.
4. Обращение с минеральным сырьём и материалами с повышенным содержанием природных радионуклидов. Санитарные правила и нормы СП-2.6.1.798-99. М.: Минздрав России, 2000. 11 с.
5. Парамонова В. И., Бартенев С. А. Применение ионного обмена к изучению состояния вещества в растворе. Изучение форм существования ниобия в растворах серной и хлорной кислот // Журнал неорганической химии. 1958. Т. III, № 1. С. 74–80.
6. Атанов И. Г., Зайцев Л. М. О дисульфате циркония // ЖНХ. 1965. Т. 10, № 10. С. 2215–2219.
7. Горощенко Я. Г., Андреева М. И. К вопросу устойчивости сульфатно-аммонийных растворов ниобия и тантала в присутствии титана // Известия Карельского и Кольского филиалов АН СССР. 1959. № 3. С. 115–126.
8. Манакова Н. К., Суворова О. В. Горнопромышленные отходы Мурманской области для получения блочных пеносиликатов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 243–245.
9. Локшин Э. П., Тареева О. А., Седнева Т. А. Переработка апатитового концентрата методом сорбционной конверсии. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2018. 64 с. DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-372-6

References

1. Lokshin E. P., Elizarova I. R., Ryskina M. P., Tareeva O. A. O sostave evdialitovogo koncentrata [About the composition of eudialyte concentrate]. *Cvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2018, No. 2, pp. 1–14. (In Russ.).
2. Ma Y., Stopic S., Friedrich B. Hydrometallurgical treatment of a Eudialyte concentrate for preparation of rare earth carbonate. *Johnson Matthey Tech.*, 2019, V. 63, No. 1, pp. 2–13.
3. Davis P., Stopic S., Balomenos E., Panias D., Paspaliaris I., Friedrich B. Leaching of rare earth elements from Eudialyte concentrate by suppressing silicon dissolution. *Minerals Engineering*, 2017, V. 108, pp. 115–122.
4. Obrashchenie s mineral'nym syr'jom i materialami s povyshennym soderzhaniem prirodnykh radionuklidov [Handling of mineral raw materials and materials with a high content of natural radionuclides]. *Sanitarnye pravila i normy Minzdrav Rossii SP-2.6.1.798-99* [Sanitary rules and regulations SP-2.6.1.798-99]. Moscow, Minzdrav Rossii, 2000, 11 p. (In Russ.).
5. Paramonova V. I., Bartenev S. A. Primenenie ionnogo obmena k izucheniyu sostoyaniya veshchestva v rastvore. Izuchenie form sushchestvovaniya niobiya v rastvorah sernoj i hlornoj kislot [Application of ion exchange to the study of the state of matter in solution. The study of the forms of the existence of niobium in solutions of sulfuric and chloric acids]. *Zhurnal neorganicheskoy himii* [Journal of Inorganic Chemistry], 1958, Vol. III, No. 1, pp. 74–80. (In Russ.).
6. Atanov I. G., Zaitsev L. M. O disulfate cirkoniy [About zirconium disulfate]. *Zhurnal neorganicheskoy himii* [Journal of inorganic chemistry], 1965, Vol. 10, No. 10, pp. 2215–2219. (In Russ.).
7. Goroshchenko Ya. G., Andreeva M. I. K voprosu ustojchivosti sulfatno-ammonijnykh rastvorov niobiya i tantala v prisutstvii titana [On the issue of stability of sulfate-ammonium solutions of niobium and tantalum in the presence of titanium]. *Izvestiya Karel'skogo i Kol'skogo filialov AN SSSR* [News of Karelian and Kola branches of the USSR Academy of Sciences], 1959, No. 3, pp. 115–126. (In Russ.).
8. Manakova N. K., Suvorova O. V. Gornopromyshlennye othody Murmanskoj oblasti dlya polucheniya blochnykh penosilikatov [Mining waste of the Murmansk region for obtaining block foam silicates]. *Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KSC RAN* [Proceedings of the Fersmanov scientific session of the GI KNC RAS], 2017, No. 14, pp. 243–245. (In Russ.).
9. Lokshin E. P., Tareeva O. A., Sedneva T. A. Pererabotka apatitovogo koncentrata metodom sorbcionnoj konversii [Processing of apatite concentrate by sorption conversion]. *Apatity, FRS KSC RAS*, 2018, 64 p. (In Russ.). doi:10.25702/KSC.978-5-91137-372-6

Информация об авторах

Э. П. Локшин — доктор технических наук, главный научный сотрудник;
О. А. Тареева — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
С. В. Дрогобужская — кандидат химических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

E. P. Lokshin — Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher;
O. A. Tareeva — PhD (Engineering), Senior Researcher;
S. V. Drogobuzhskaya — PhD (Chemistry), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 05.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 14.02.2023.
The article was submitted 05.02.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 14.02.2023.