

ПЕРЕРАБОТКА РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО КУЛАРИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Каминский Ю.Д. Email: Kaminskiy1179@scientifictext.ru

Каминский Юрий Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт химии твердого тела и механохимии,
Сибирское отделение
Российская академия наук, г. Новосибирск

Аннотация: в работе подробно рассмотрены варианты процессов, которые могут быть использованы для переработки куларитового концентрата, полученного из эфелей ранее отработанной россыпи золота Республики Саха (Якутия).

Целью исследований являлось, во-первых, - опробование способов вскрытия РЗМ-концентрата и извлечение РЗМ, во-вторых, - опробование способов очистки растворов РЗМ от примесей и выделение коллективных продуктов РЗМ. Изучение поведения РЗМ и примесей при очистке и выделении.

Для разработки технологии переработки представленного типа концентратов рекомендуется рассматривать два метода вскрытия: способ сульфатизации и способ щелочного разложения (либо сплавление с щелочью).

Способы дробного осаждения гидроксидов и двойных сульфатов позволяют довольно просто очиститься от основного количества примесей (Fe, Al, и других) и выделить РЗМ в коллективный концентрат. Для осаждения двойных сульфатов желательно использовать сернокислые растворы.

Ключевые слова: РЗМ-концентрат, вскрытие, спекание, плавка, сульфатизация, очистки растворов, дробное осаждение, двойные сульфаты.

PROCESSING RARE EARTH KULARITE CONCENTRATE

Kaminskiy Yu.D.

Kaminskiy Yuriy Dmitrievich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
INSTITUTE OF SOLID STATE CHEMISTRY AND MECHANOCHEMISTRY,
SIBERIAN BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES,
NOVOSIBIRSK

Abstract: the paper considers in detail the variants of processes that can be used for processing kularite concentrate obtained from ephels, previously spent gold placer of the Republic of Sakha (Yakutia). The purpose of the research was, firstly, to test methods for opening rare-earth concentrate and extracting rare-earth, and secondly, to test methods for cleaning rare-earth solutions from impurities and isolating collective rare-earth products. Study of the behavior of rare-earth and impurities during purification and isolation. To develop a technology for processing the presented type of concentrates, it is recommended to consider two methods of opening: - the method of sulfatization and the method of alkaline decomposition (or fusion with alkali). Methods of fractional precipitation of hydroxides and double sulfates make it quite easy to clear the main amount of impurities (Fe, Al, and others) and isolate rare-earth into a collective concentrate. For the precipitation of double sulfates, it is desirable to use sulfuric acid solutions.

Keywords: rare-earth concentrate, opening, sintering, melting, sulfatization, solution purification, fractional precipitation, double sulfates.

Введение

Существует два основных подхода к переработке монацита кислотный и щелочной [1]. В работах [2, 3] рассмотрено влияние процессов механоактивации куларита на его сернокислотное выщелачивание. В данной работе подробно рассмотрены варианты процессов, которые могут быть применены для переработки куларитового концентрата.

Таблица 1. Содержание редкоземельных металлов в концентрате

Элемент	Ce	La	Pr	Nd	Sm	Eu
Содержание в концентрате, %	13,4	7,8	2,8	4,9	2,0	0,125
Элемент	Gd	Dy	Er	Tm	Yb	Ln
Содержание в концентрате, %	0,36	0,78	0,15	0,001	0,0043	1·10 ⁻⁴

Таблица 2. Содержание примесей в концентрате

Элемент	Sc	U	Th	Mn	Zr	Fe	S _{общ}	P
---------	----	---	----	----	----	----	------------------	---

Содержание в концентрате, %	0,0014	0,0434	0,572	0,066	<0,01	6,35	4,6	6,0
Элемент	Sn	Ca	Mg	Pb	Cu	Ti	Cr	
Содержание в концентрате, %	4,25	0,1	0,06	0,55	0,024	0,33	0,1	

В качестве исходного сырья использовался куларитовый концентрат редкоземельных металлов (РЗМ) крупностью (-1,25 +0,03 мм) [4]. От концентрата отобрали среднюю пробу для определения химического и минералогического состава. Полученный химический состав представлен в таблицах 1, 2:

Минералогический анализ показал, что данный концентрат представлен в основном монацитом (РЗМ,Th)PO₄ и касситеритом (SnO₂).

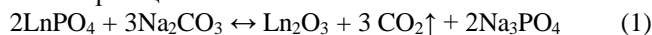
Исходный концентрат подвергался механоактивации в планетарной мельнице ЛАИР-0,015 [5]. При этом он измельчался до класса минус 74 мкм (35 %).

Целью исследований являлось опробование способов вскрытия РЗМ концентрата [6], очистки и выделения РЗМ.

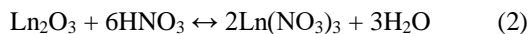
1. Опробование способов вскрытия куларитового концентрата.

Спекание концентрата с содой.

Процесс спекания с содой проводили при t=850 °С, τ=1 час и расходе соды 200 и 300 % от СНК. Процесс вскрытия протекает по реакции:



Полученный спек подвергался водной отмывке от непрореагировавшей соды и фосфата натрия. Нерастворимый остаток фильтровался, промывался горячей водой и подвергался азотнокислomu выщелачиванию при Т:Ж= 1:10; C_{HNO₃} = 35 %; t=90-100 °С и τ=2 час с целью перевода в раствор РЗМ по реакции:



Не растворившийся остаток отфильтровывался, промывался горячей водой и сушился. Полученные растворы и твердые остатки (кеки) анализировались на содержание в них РЗМ и примесей. Результаты анализа продуктов приведены в табл. 3 (опыты 1,2).

Балансовые расходы проводились по Се, La, Nd и Pr. Как видно из результатов экспериментов (табл. 3) процесс спекания при 200 % расхода соды, не обеспечивает достаточно полного вскрытия концентрата. При этом потеря веса составляет 52,0 % (опыт 1) и 58,5 (опыт 2).

Таблица 3. Результаты анализа продуктов спекания концентрата с содой

Элемент	Оп. 1. Расход соды 200 % от СНК		Извлечение, %		Оп. 2. Расход соды 300 % от СНК		Извлечение, %	
	Раствор, г/л	Кек, %	Раствор	Кек	Раствор, г/л	Кек, %	Раствор	Кек
Ce	2,66	12,20	40,7	43,7	4,87	10,20	56,0	31,6
La	2,40	5,30	63,0	32,5	3,50	4,70	69,1	25,1
Nd	1,36	5,20	56,9	51,0	1,96	4,77	61,6	40,4
Pr	0,69	2,56	50,5	43,9	1,03	2,32	56,7	34,4
Al	0,360	0,26			0,450	0,16		
Ca	0,056	0,18			0,060	0,1		
Fe	2,79	3,65			4,4	0,72		
Mg	0,036	0,02			0,054	0,01		
Pb	0,280	0,09			0,350	0,04		
Sn	0,032	н.о.			0,150	н.о.		

Извлечение в раствор РЗМ составляет всего 40-60 %. Увеличение расхода соды до 300 % от стехиометрически необходимого количества (СНК) приводит к незначительному увеличению степени вскрытия РЗМ. Вероятно, для достижения удовлетворительной степени вскрытия концентрата, требуется значительного увеличения расхода воды (>> 300 %) и повышение температуры спекания (> 900 °С).

Плавка концентрата с селитрой

Процесс плавки [7] проводили при t=500 °С, τ= 2 час, соотношении концентрат : сода : селитра = 1:0,5:1,4 (Оп. 3), 1:0,9:1,8 (Оп. 4). Процесс вскрытия очевидно аналогичен при спекании с содой и протекает по реакции (1). Селитра в этом процессе служит в качестве жидкотекучего расплава и растворителя соды. Полученный плав подвергался водной отмывке от непрореагировавших соды и селитры. Нерастворившийся остаток отфильтровывался, промывался горячей водой и подвергался азотнокислomu выщелачиванию при т:ж= 1:10; C_{HNO₃} = 35 %; t=90-100 °С и τ=2 час с целью перевода в раствор РЗМ по реакции (2). Нерастворившийся остаток фильтровался, промывался водой и сушился.

Потеря веса составляет 55,0 % (опыт 3) и 58,5 (опыт 4). Результаты анализа полученных растворов, кеков и балансовых расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты анализа продуктов плавки концентрата с селитрой

Элемент	Оп. 3.		Извлечение, %		Оп. 4.		Извлечение, %	
	Раствор, г/л	Кек, %	Раствор	Кек	Раствор, г/л	Кек, %	Раствор	Кек
Ce	2,74	17,70	29,0	59,4	2,82	16,1	41,8	49,9
La	5,35	1,59	97,4	9,2	4,15	1,19	105,8	6,3
Nd	3,40	1,76	98,5	16,2	2,59	1,44	105,1	12,2
Pr	1,69	0,92	85,7	14,8	1,40	0,69	99,4	10,2
Al	0,500	0,40			0,380	0,42		
Ca	0,075	0,06			0,058	0,05		
Fe	4,50	2,23			3,52	1,80		
Mg	0,046	0,01			0,034	0,01		
Pb	0,440	0,21			0,330	0,16		
Sn	0,038	н.о.			0,021	н.о.		

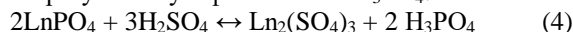
Результаты экспериментов показывают на удовлетворительную эффективность вскрытия концентрата данным способом при используемых условиях. Неблагоприятное поведение церия в процессе плавки (его ~ 60 % остается в кек) можно объяснить наличием в расплаве окислителя (присутствие NaNO_3), при этом возможна реакция окисления церия:



Оксид церия (IV) переходит в раствор при обычном кислотном растворении.

Сульфатизация концентрата концентрированной серной кислотой.

Процесс сульфатизации заключается в смешении концентрата с концентрированной серной кислотой (96 %) в соотношении 1:2 и выдержкой смеси при 250 °С в течение 2 часов. В результате взаимодействия моноцита с серной кислотой образуются сульфаты РЗМ и H_3PO_4 :



После охлаждения полученная паста выщелачивалась водой при $t \leq 30$ °С, т:ж = 1:10, в течение 1 часа. При этом сульфаты РЗМ, H_3PO_4 и H_2SO_4 переходят в раствор. Нерастворившийся остаток отфильтровывался, промывался горячей водой и высушивался. Потеря веса составляет 71,3 % (опыт 5). Результаты анализа полученных растворов, кеков и балансовых расчетов приведены в табл. 5.

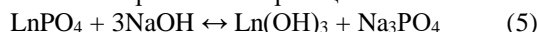
Таблица 5. Результаты анализа продуктов сульфатизация концентрата серной кислотой

Элемент	Оп. 5.		Извлечение, %		Невязка баланса
	Раствор, г/л	Кек, %	Раствор	Кек	
Ce	10,60	0,44	98,9	0,9	-0,2
La	7,10	0,39	113,0	1,4	+14,4
Nd	4,50	0,15	114,8	0,9	+15,7
Pr	2,25	0,07	100,4	0,07	+0,47
Al	0,645	0,09			
Ca	0,075	н.о.			
Fe	6,20	0,64			
Mg	0,046	н.о.			
Pb	0,031	0,65			
Sn	0,060	н.о.			

Результаты эксперимента показали, что концентрированная серная кислота является весьма эффективным вскрывающим реагентом. Извлечение РЗМ в раствор составило в среднем 99 % при остаточном содержании РЗМ в кек 0,07-1,4 %. Содержание примесей в полученных растворах, однако, также повышается (за исключением Рв, вследствие образования нерастворимого сульфата).

Щелочное разложение концентрата

Разложение концентрата проводили концентрированным раствором щелочи (50 %) при температуре (t) 130 – 140 °С, расходе $\text{NaOH} = 280$ % от СНК в течение (τ) 2,5 или 4 часов с периодическим перемешиванием. Процесс разложения протекает по реакции:



Далее пульпу разбавляли до т:ж=1:10 и растворяли Na_3PO_4 и избыточную NaOH . Нерастворимый остаток отделяли фильтрацией, промывали горячей водой и подвергали кислотному выщелачиванию при Т:Ж=1:10, t = 80-90 °С в течение 1 часа, используя HCl и HNO_3 с концентрацией, соответственно 18 и 35

% . Нерастворившиеся остатки отделяли фильтрацией, промывали горячей водой и высушивали. Потеря веса составляет 73,8 % (опыт 6) и 72,5 (опыт 7) табл.6.

Таблица 6. Результаты анализа продуктов - щелочное разложение концентрата

Элемент	Оп. 6. $\tau = 2,5$ ч, Растворитель HNO_3		Извлечение, %		Оп. 7. $\tau = 4$ ч, Растворитель HCl		Извлечение, %	
	Раствор, г/л	Кек, %	Раствор	Кек	Раствор, г/л	Кек, %	Раствор	Кек
Ce	10,50	1,87	92,1	3,7	7,42	4,20	66,4	8,6
La	7,10	1,21	106,2	4,1	4,20	2,50	64,6	8,8
Nd	4,50	0,87	107,9	4,7	3,15	1,70	77,1	9,5
Pr	2,25	0,42	94,4	3,9	1,62	0,85	69,4	8,3
Al	0,500	0,33			0,440	0,40		
Ca	0,090	0,06			0,080	0,06		
Fe	6,60	0,67			2,80	7,50		
Mg	0,075	0,01			0,140	0,03		
Pb	0,650	0,015			н.о.	0,03		
Sn	0,021	н.о.			н.о.	н.о.		

Как видно из результатов экспериментов, данный способ разложения, с использованием в качестве растворителя HNO_3 , является достаточно эффективным. Извлечение РЗМ в раствор составляет 90-96 % (оценка по кекам) при остаточном содержании РЗМ в кеке 0,4-4,2 %. Использование же для растворения РЗМ соляной кислоты вместо азотной позволяет снизить более чем в два раза содержание железа (основной примеси) в растворе.

В ходе исследований были также опробованы способы прямого азотнокислого выщелачивания и щелочного автоклавного вскрытия коллективного концентрата: - азотнокислого выщелачивания: Т:Ж=1:10; $t = 95-100$ °С; $C_{\text{HNO}_3}=500$ г/л; $\tau = 4$ час; - щелочного автоклавного вскрытия: Т:Ж=1:10; $t = 200$ °С; $C_{\text{NaOH}}=7$ %; $\tau = 2$ час с последующим кислотным выщелачиванием – HNO_3 (1:1), HCl (1:1), H_2SO_4 (1:2).

Степень разложения концентрата (извлечение РЗМ в раствор) не превышает 15-25 % в обоих случаях, что говорит о невозможности вскрытия концентрата данными методами с получением приемлемых результатов.

Анализируя результаты проведенных поисковых исследований можно отметить о следующих особенностях исследованных способов разложения концентрата:

- способ спекания концентрата с содой может обеспечить достаточную эффективность вскрытия лишь в случае применения расхода соды (> 300 % от СНК) либо более высоких температурах спекания (> 850 °С);

- способ плавки с селитрой также требует высоких расходов соды и селитры для создания жидкотекучего расплава и обеспечение протекания реакции разложения между концентратом и содой, что характеризует его с отрицательной стороны. К тому же в ходе плавки протекает неблагоприятный процесс окисления церия, что приводит к распределению последнего между кеком и кислым раствором;

- способ сульфатизации является эффективным методом разложения концентрата, однако, он сопровождается повышенным содержанием некоторых примесей (Fe, Al, Sn и др.) в получаемых РЗМ-содержащих растворах и требует использование специальных средств вентиляции и очистки газов от выделений сернистых газов и паров H_2SO_4 ;

- способ щелочного разложения является благоприятным методом вскрытия концентрата, так как позволяет достаточно полно вскрыть представленный РЗМ-концентрат, а также предусматривает использование не сложного в изготовлении и эксплуатации оборудования.

2. Опробование способов очистки и выделение РЗМ из растворов

Дробное осаждение гидроксидов

Данный способ очистки основан на различии рН осаждения гидроксидов некоторых примесей, таких как Fe^{2+} (рН=2,3), Zr^{4+} (рН=2,0), Ti^{4+} (рН=0,7), Th (рН=3,0) и гидроксидов РЗМ (рН $\geq 6,3$).

Таблица 7. Химический состав продуктов, полученных при очистке от примесей и их выделении

№ опыта	Способ	Шифр материала	Содержание в материале, %				Извлечение, %			
			Ce	La	Nd	Pr	Ce	La	Nd	Pr
1	Дробное осаждение гидроксидов	K1	10,3	4,00	4,50	2,20	53,7	18,6	31,5	30,5
		K2	13,7	25,0	15,9	7,40	35,9	58,5	56,0	51,7
2	Дробное	K3	2,0	0,26	1,19	0,84	4,3	0,8	6,30	8,5

	осаждение гидроксидов	K4	30,8	22,8	12,3	6,10	82,2	84,7	81,6	77,0
3	Дробное осаждение гидроксидов	K5	8,4	0,07	0,09	0,05	8,3	0,1	0,21	0,23
		K6	29,4	18,0	14,4	7,30	84,4	91,3	97,4	96,0
4	Осаждение двойных сульфатов	K7	15,4	9,30	6,70	3,30	92,3	83,8	94,5	93,1
		K8	0,1	0,05	0,04	0,04	0,1	0,1	0,12	0,25
		K9	3,0	2,5	1,54	0,82	0,8	1,0	0,96	1,0
		K10	0,01	0,01	0,005	0,005	0,02	0,02	0,02	0,04
		K11	0,01	0,01	0,005	0,005	0,001	0,003	0,001	0,003
5	Осаждение двойных сульфатов	K12	18,20	9,40	7,400	3,700	63,3	48,3	60,0	60,0
		K13	12,2	6,9	5,4	2,7	3,8	3,2	3,9	3,9

Опыт 1: исходный раствор – азотнокислый раствор от сплавления концентрата с селитрой (см. опыт 4, табл.4; осадитель - раствор NaOH (400 и 10 г/л); pH осаждения железа – 5 (гидроксид железа – K1, гидроксиды РЗМ – K2).

Опыт 2: исходный раствор – азотнокислый раствор от спекания концентрата с содой (см. опыт 2, табл.3); осадитель - раствор NaOH (400 и 10 г/л); pH осаждения железа – 3 (гидроксид железа – K3, гидроксиды РЗМ – K4).

Опыт 3: исходный раствор – солянокислый раствор от щелочного разложения концентрата (см. опыт 7, табл.6; осадитель - раствор NH₄OH (25-2,5 %); pH осаждения железа – 3-4. В исходный раствор перед нейтрализацией добавляли в раствор H₂O₂ для окисления Fe²⁺ до Fe³⁺ и восстановления Ce⁴⁺ до Ce³⁺ (гидроксид железа – K5, гидроксиды РЗМ – K6).

Осаждение проводили в следующем порядке: нейтрализация исходного раствора крепким раствором NaOH (400 г/л) или NH₄OH (25 %) до слабого получения pH ~ 0; нейтрализация разбавленным раствором NaOH (10 г/л) или NH₄OH (2,5 %) до pH=3÷5 (осаждение гидроксидов примесей); выдержка пульпы при подогреве t > 90 °C и поддержании pH в течении 0,5 часа, затем охлаждение; фильтрация, промывка, сушка осадка; из фильтрата осаждение гидроксидов РЗМ крепкими растворами NaOH или NH₄OH при pH = 11÷12 и подогреве t = 80-90 °C в течение 1 часа; охлаждение, фильтрация осадка, промывка, сушка.

Как видно из результатов опытов (табл. 7, 8), условия осаждения гидроксида железа значительно влияют на степень соосаждения гидроксидов РЗМ с железом. В случае величины pH осаждения железа равном 5, потери РЗМ с гидроксидом железа составляют 18-54 %, в то время как при pH=3 потери составляют всего 0,1-8,5 %. Суммарное содержание примесей в полученном коллективном концентрате гидроксидов РЗМ составляет 1-1,5 % (материалы K4 и K6 табл.7, 8).

Осаждение двойных сульфатов натрия и РЗМ

Данный способ очистки основан на образовании нерастворимых двойных сульфатов натрия и РЗМ церивой группы (Ce, La, Nd, Pm, Sm) состава типа Na_xLn_x(SO₄)₂·nH₂O.

Осаждение проводилось из серноокислого или азотнокислого растворов. Исходным раствором являлся серноокислый раствор от сульфатизации концентрата (опыт 5, табл. 5). В раствор вливался раствор NaOH (400 г/л). Вследствие нейтрализации серной кислоты образовывался сульфат натрия. Полученный в растворе Na₂SO₄ образовывал с сульфатами РЗМ церивой группы двойные сульфаты, выпадающие в осадок. Пульпа выдерживалась при перемешивании, подогреве при t = 80-90 °C и поддержании заданного значения pH в течение 0,5 часа. Осадок отделялся фильтрацией, промывался водой, высушивался и анализировался на содержание РЗМ и примесей. Из раствора проводилось последовательное осаждение оставшихся РЗМ и примесей при более высоких pH. Результаты экспериментов представлены в табл. 7, 8 в опыте 4. Представлены составы осадков, полученных при: pH = 0 – материал K7; pH = 1,6 – материал K8; pH = 3,0 – материал K9; pH = 10 – материал K10.

Таблица 8. Химический состав продуктов, полученных при очистке от примесей и их выделении

№ опыта	Способ	Шифр материала	Содержание в материале, %					
			Al	Ca	Fe	Mg	Pb	Sn
1	Дробное осаждение гидроксидов	K1	0,51	0,001	17,70	0,02	1,36	0,077
		K2	0,38	0,040	0,04	0,16	0,82	0,420
2	Дробное	K3	> 5,00	0,006	33,60	0,02	1,91	1,240

	Осаждение гидроксидов	K4	0,07	0,035	0,07	0,15	0,92	0,033
3	Дробное осаждение гидроксидов	K5	4,30	0,001	29,00	0,02	0,04	н.о.
		K6	0,20	0,01	0,006	0,01	н.о.	н.о.
4	Осаждение Двойных сульфатов	K7	0,04	0,09	2,03	0,02	0,057	0,10
		K8	0,56	<0,001	24,4	0,02	0,014	0,056
		K9	8,20	0,13	5,24	0,02	0,035	0,024
		K10	0,008	0,03	0,28	5,40	0,0043	0,004
		K11	0,008	0,36	0,21	22,3	0,0046	0,008
5	Осаждение двойных сульфатов	K12	0,06	0,03	0,03	0,0005	н.о	н.о
		K13	0,06	0,03	6,8	0,0006	н.о	н.о

Осаждение из азотнокислого раствора.

Исходным раствором являлся азотнокислый раствор от щелочного разложения концентрата (опыт 6, табл. 6).

Предварительно азотнокислый раствор нейтрализовали – до pH = 0,5 раствором NaOH (400 г/л). Затем при исследовании в него вливали раствор Na₂SO₄ (100 г/л) в количестве необходимом для получения молярного соотношения в растворе Ln : SO₄ = 1:3 плюс 10 % избыток Na₂SO₄. Раствор при перемешивании и подогреве выдерживали в течение 1 часа. После охлаждения и отстаивания образовывалось два слоя осадка: нижний – белый и верхний – желтоватый, колоидообразный. Осадки разделяли декантацией и распульповкой, отфильтровывали, промывали и высушивали. Результаты анализа осадков приведены в табл. 7, 8: K12 – белый осадок, K13 – желтоватый осадок.

Как показывают результаты экспериментов основная часть РЗМ осаждается в виде двойных сульфатов при pH=0 (см. материал K7 табл. 7, 8). Дальнейшее повышение pH приводит к последовательному осаждению примесей (Fe, Al, Mg и других). Избыток Na₂SO₄ над СНК в опыте 4 составлял 200-300 %. Тогда как в опыте 5 избыток составлял всего 10 %. Этим, очевидно, и объясняется недостаточная степень осаждения двойных сульфатов РЗМ, которая вероятно зависит от избытка Na₂SO₄ в растворе. Разделение полученных осадков на стадии отстаивания показывает на то, что примеси Fe в осадке, возможно не входит в состав двойных сульфатов и образует отдельное соединение (гидроксид, Na-ярозит). Суммарное содержание примесей в РЗМ-концентрате, составляет не более 2,5 %.

Выводы, рекомендации

Как показали исследования способов дробного осаждения гидроксидов и двойных сульфатов позволяют довольно просто очиститься от основного количества примесей (Fe, Al, и других) и выделить РЗМ в коллективный концентрат. Для осаждения двойных сульфатов желательнее использовать сернокислые растворы, так как ион SO₄⁻ уже находится в растворе и Na₂SO₄ получается при нейтрализации раствора щелочью. При использовании других растворов (HCl, HNO₃) на финишной стадии будут получаться смешанные маточные растворы (NaCl + Na₂SO₄ или NaNO₃ + Na₂SO₄), требующие дополнительных процессов утилизации. Для дробного осаждения гидроксидов лучше использовать солянокислые растворы, так как они содержат меньшее количество примесей (Fe, Al, Ca и других), что уменьшает количество потерь РЗМ с гидроксидом железа. Полученный коллективный РЗМ-концентрат удобен для дальнейшей переработки, так как содержит 70-75 % суммы РЗМ, всего 1-1,5 % примесей и легко растворяется в кислотах.

Список литературы / References

1. Шахно И.В. Химия и технология редких и рассеянных элементов, ч. II: учеб. пособие для вузов / И.В. Шахно, З.Н. Шевцова, П.И. Федоров, С.С. Коровин; под ред. К.А. Большакова; Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1976. 359 с.
2. Исупов В.П., Бородулина И.А., Шацкая С.С., Юсупов Т.С. Перспективы применения механохимии для переработки редкоземельного куларитового концентрата // Труды НГАСУ, 2016. Т.19. № 2 (62). С. 41-49.
3. Исупов В.П., Бородулина И.А., Шацкая С.С., Юсупов Т.С. Применение механохимии для переработки куларитового концентрата // Материалы V Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Томск, 2016. 13-16 сентября 2016 г. С. 266-269.
4. Каминский Ю.Д. Вовлечение в переработку техногенных отходов (механохимия для экологии) / отв. ред. Е.Г. Аввакумов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т химии твердого тела и механохимии. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2018. 295 с
5. Каминский Ю.Д. Механохимические реакторы планетарного типа: Теория и практика/ ред. Е.Г. Аввакумов. Новосибирск: Наука, 2015. 200 с.

6. Каминский Ю.Д. Получение куларитового концентрата из хвостов обогащения золотопереработки // Наука, техника и образование. № 3 (78), 2021. С. 5-13.
7. А.С. № 1650584 Плав для разложения карбонатов щелочноземельных металлов / Маценко Ю.А., Шевцов Ю.В., Каминский Ю.Д. Дата рег. 23.05.1991. Бюл. 19.