

Научная статья  
УДК 669.793<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-633-642>

## Переработка формиатных растворов после выщелачивания красного шлама

Виктор Михайлович Сизяков<sup>1</sup>, Борис Александрович Козырев<sup>2</sup>✉

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> [kafmet@spmi.ru](mailto:kafmet@spmi.ru)<sup>2</sup> [kozirev-48@yandex.ru](mailto:kozirev-48@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9926-8212>

**Аннотация.** Цель – определение показателей разработанной технологической схемы комплексной переработки красного шлама формиатным методом: извлечение компонентов, выход и состав продуктов при переработке пробы формиатного раствора, полученного после выщелачивания красного шлама. В эксперименте использовался красный шлам, образующийся при производстве глинозема на Уральском алюминиевом заводе. Полученные пробы формиатного раствора после выщелачивания шлама анализировались на спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Optima 8000, для измерения влажности использовался анализатор влажности Sartorius MA-30, для измерения массовой доли элементов в металлических и неметаллических образцах, находящихся в твердом, жидком и порошкообразном состояниях, применялся рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL 9800. Эксперименты велись при постоянном измерении и контроле значений pH при помощи pH-метра с функцией термокомпенсации. Проведены экспериментальные работы по сквозному извлечению ценных элементов из формиатных растворов выщелачивания красного шлама. Концентрат, содержащий Al, Sc, редкоземельные элементы, перерабатывается в самостоятельные продукты – оксид скандия и концентрат с редкоземельными металлами (после перевода алюминия в раствор путем его растворения в щелочи). Показано, что редкоземельные металлы и скандий концентрируются в твердой фазе, скандий затем селективно выщелачивается содобикарбонатным раствором с образованием водорастворимых карбонатных комплексов типа  $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_4]^{5-}$  с карбонат-ионами  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . В целом при использовании предлагаемой технологии извлечение скандия, редкоземельных элементов составило 98–99%; алюминия, формиатов кальция и натрия из производственного раствора – 99%. Конечными продуктами переработки формиатного раствора являются оксид скандия (с содержанием  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  99% масс.), концентрат редкоземельных элементов (с содержанием 56,1%). Показана принципиальная возможность переработки растворов, полученных после проточного выщелачивания красного шлама формиатным способом.

**Ключевые слова:** глиноземное производство, красный шлам, переработка отходов, скандий, муравьиная кислота, формиаты

**Для цитирования:** Сизяков В. М., Козырев Б. А. Переработка формиатных растворов после выщелачивания красного шлама // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 633–642. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-633-642>.

### METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Original article

## Processing of formate solutions obtained from red mud leaching

Viktor M. Sizyakov<sup>1</sup>, Boris A. Kozyrev<sup>2</sup>✉

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> [kafmet@spmi.ru](mailto:kafmet@spmi.ru)<sup>2</sup> [kozirev-48@yandex.ru](mailto:kozirev-48@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9926-8212>

**Abstract.** The paper determines the indicators of the developed process flow for the complex processing of red sludge via the formate method: recovery of components; yield and composition of products when processing a sample of formate solution obtained from red mud leaching. The conducted experiments used red mud generated in the production of alumina at the Urals Aluminium Smelter. The samples of formate solution obtained in the course of red mud leaching

© Сизяков В. М., Козырев Б. А., 2021

<https://vestirgtu.elpub.ru>

633

were analyzed using an Optima 8000 ICP-OES Spectrometer, a Sartorius MA-30 Moisture Analyzer to measure moisture content, as well as an ARL 9800 XRF Spectrometer to ascertain the mass fraction of elements in metal and nonmetal specimens found in one of three states (solid, liquid, or powder). These experiments were performed while continuously measuring and monitoring pH values by means of a pH meter having a thermal compensation function. The performed experiments involved the total recovery of valuable elements from formate solutions produced during red mud leaching. A concentrate containing Al, Sc, and rare earth elements (REEs) was processed to produce scandium oxide and rare earth metal concentrate (after dissolving aluminum in an alkali). Rare earth metals and scandium were shown to concentrate in the solid phase; scandium was then selectively leached with a sodium bicarbonate solution to form water-soluble carbonate complexes  $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_4]^{5-}$  having carbonate ions  $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{HCO}_3^-$ . When using the proposed technology, the overall recovery of scandium and REEs amounts to 98–99%, whereas that of aluminum, calcium formate, and sodium formate from the produced solution reaches 99%. The processing of formate solution yields the following end products: scandium oxide (99 wt%  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ) and REE concentrate (content of 56.1%). The paper demonstrates the possibility in principle to process solutions obtained from the flow-through leaching of red mud via the formate method.

**Keywords:** alumina production, red mud, waste processing, scandium, formic acid, formates

**For citation:** Sizyakov V. M., Kozyrev B. A. Processing of formate solutions obtained from red mud leaching. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):633-642. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-633-642>.

## ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевая отрасль России развивается по пути совершенствования и оптимизации технологических процессов получения глинозема [1–3], первичного алюминия [4, 5], готовой алюминийсодержащей продукции [6–9]. Однако металлургическое производство сопровождается образованием значительного количества разнообразных твердых отходов [10].

Проблема накопления и утилизации красного шлама глиноземного производства хорошо известна, применяются разнообразные подходы для ее решения, большинство из которых были отвергнуты производственным сектором из-за их низкой эффективности [11–14]. В то же время масштабность проблемы и связанного с ней загрязнения окружающей среды только возрастает, что является следствием неуклонного повышения потребления и производства алюминия, которое практически утроилось за последние 20 лет и к настоящему времени составляет около 63 млн т в год (что в пересчете на годовой объем потребляемого глинозема составляет 119 млн т). При этом основным высококачественным сырьем для производства глинозема, используемого для получения первичного алюминия, остаются бокситы, объем добычи и переработки которых может оцениваться на уровне 250 млн т в год (с накоплением отходов их переработки щелочными способами в размере от 1 до 2,5 т на 1 т глинозема). Очевидно, что выбор рационального подхода для переработки красного шлама определяется не только имеющимися техни-

ческими возможностями, но также экономическими и экологическими факторами, действующей законодательной базой, регионом накопления отходов и др. [15–17]. С учетом значительного количества востребованных и достаточно ценных компонентов в составе красного шлама к настоящему моменту сложилось вполне четкое представление об этом виде отходов как рудном сырье техногенного происхождения, эффективность переработки которого связана с его комплексным использованием.

В этой связи заметный интерес представляет использование на начальных этапах переработки красного шлама муравьиной кислоты, что обеспечивает извлечение в раствор практически всех ценных компонентов (за исключением железа). Уже на этом этапе можно получать концентрат, отвечающий требованиям металлургической промышленности. В ходе отработки технологической последовательности операций и режимов их осуществления были определены стадии технологической схемы для последующего извлечения компонентов, перешедших в раствор, с получением соответствующих концентратов и продуктов (рис. 1, здесь РЗЭ – редкоземельные элементы). Это позволило:

- поставить в качестве основной задачи исследований определение показателей данной технологической схемы по извлечению компонентов, выходу и составу продуктов при сквозной переработке пробы формиатного раствора;

- подготовить информацию для составления материального баланса данного пере-

дела и определения его качественно-количественной схемы с последующей технико-экономической оценкой.

Проба формиатного раствора была получена путем выщелачивания красного шлама, принципиальная схема лабораторной установки по проточному выщелачиванию пред-

ставлена на рис. 2. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема представлена на рис. 3, были проведены опыты по разделению ценных компонентов из продукционных растворов формиатного выщелачивания красного шлама. Данное направление переработки растворов ранее не исследовалось.

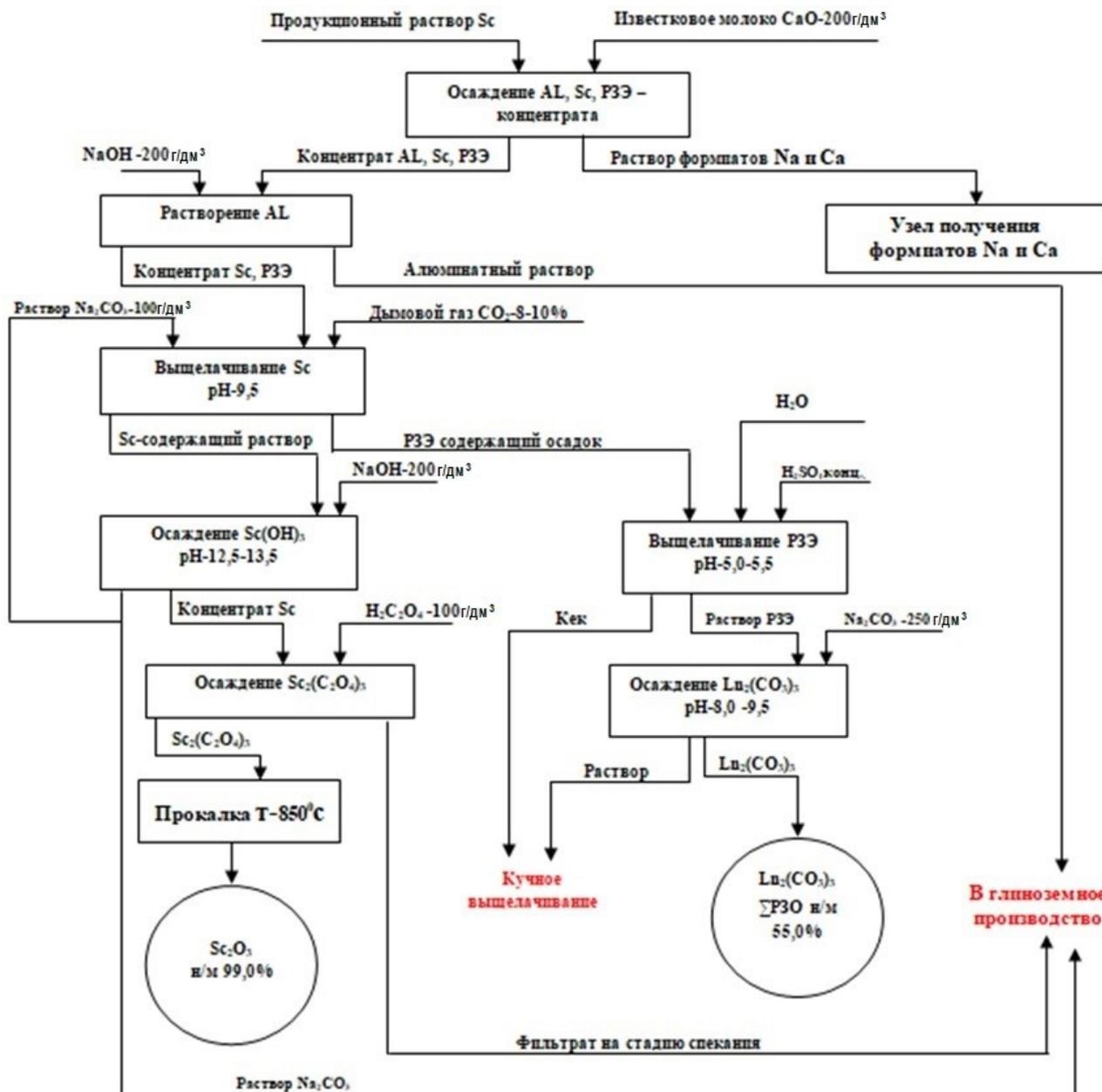


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема узла получения оксида скандия и концентрата редкоземельных элементов из продукционного раствора проточного выщелачивания  
Fig. 1. Schematic flow diagram of the production unit of scandium oxide and rare earth element concentrate from the production solution of flow leaching

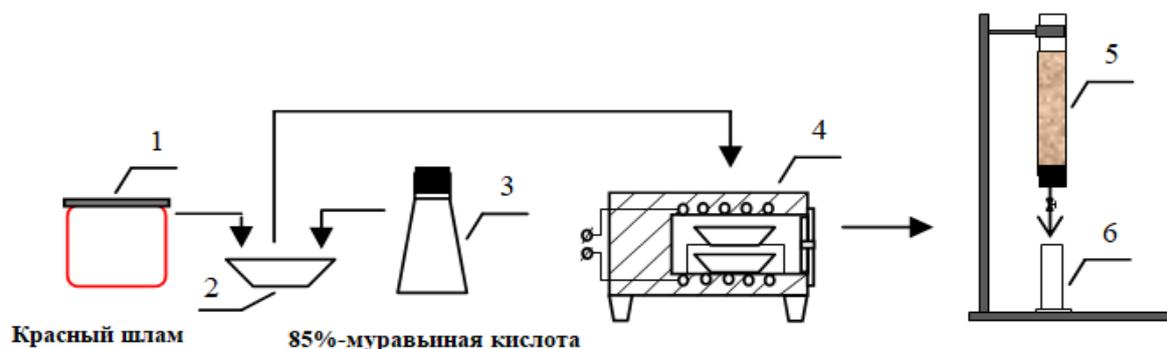


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки по проточному выщелачиванию:  
 1 – проба красного шлама; 2 – фарфоровая чашка; 3 – 85% муравьиная кислота; 4 – сушильный шкаф;  
 5 – колонка для проточного выщелачивания; 6 – цилиндр для сбора продукционного раствора  
 Fig. 2. Schematic diagram of a laboratory installation for flow leaching: 1 – red mud sample;  
 2 – porcelain cup; 3 – 85% formic acid; 4 – drying box; 5 – column for flow leaching; 6 – cylinder for product solution collection

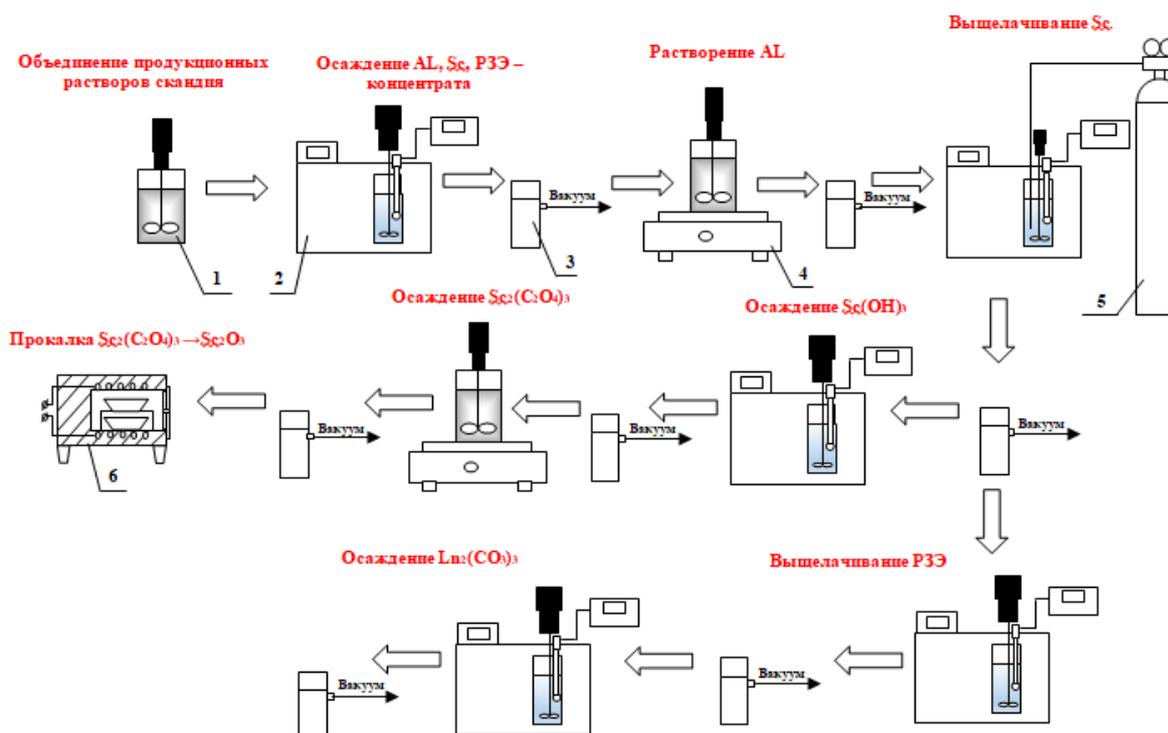


Рис. 3. Принципиальная аппаратурно-технологическая схема переработки формиатных растворов после выщелачивания красного шлама с получением оксида скандия и концентрата редкоземельных элементов:  
 1 – реактор для выщелачивания; 2 – термостат; 3 – вакуумный фильтр; 4 – электроплитка; 5 – газовый баллон с CO<sub>2</sub>; 6 – муфельная печь

Fig. 3. Basic process flow diagram of formate solution processing from red mud leaching with obtaining of scandium oxide and concentrate of rare earth elements: 1 – leaching reactor; 2 – thermal bath; 3 – vacuum filter; 4 – electric hot plate; 5 – CO<sub>2</sub> gas cylinder; 6 – muffle furnace

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Навеску красного шлама, образующегося при получении глинозема на Уральском

алюминиевом заводе (УАЗе), смешивали с 85% муравьиной кислотой в фарфоровой чашке. Количество реагента рассчитывалось исходя из реакции взаимодействия с основ-

ными извлекаемыми элементами. Полученную смесь выдерживали в сушильном шкафу при температуре 110°C в течение 4 ч. Далее усредняли фракционный состав материала, доизмельчая крупные куски шлама; загружали подготовленную смесь в стеклянную колонку, в нижней части которой имелось встроенное дренажное устройство, позволяющее задерживать частицы красного шлама и пропускать через себя раствор. Прошедший через слой красного шлама раствор собирали в мерный цилиндр и анализировали на спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Optima 8000. Для измерения влажности использовался анализатор влажности Sartorius MA-30, для измерения массовой доли элементов в металлических и неметаллических образцах, находящихся в твердом, жидком и порошкообразном состояниях, использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL 9800. Опыты проводились при постоянном измерении и контроле значений pH, для этого был задействован pH-метр с функцией термокомпенсации (портативный pH-метр / милливольтметр / термометр HANNA HI 83141). Далее полученные производственные растворы перерабатывали по схеме, представленной на рис. 1. Лабораторная установка получения оксида скандия и концентрата РЗЭ из производственных растворов формиатного выщелачивания красного шлама отображена на рис. 3.

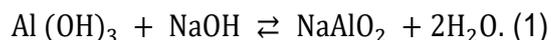
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Производственный раствор проточного выщелачивания красного шлама имел состав, представленный в табл. 1.

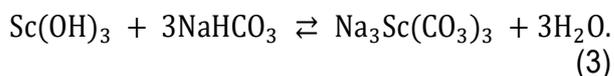
Данный химический состав, который формируется в результате протекания следующих химических реакций взаимодействий

муравьиной кислоты с минеральными компонентами красного шлама (сырья):

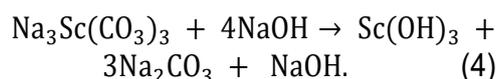
Растворение алюминия:



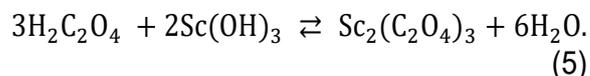
Выщелачивание скандия:



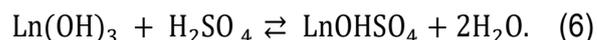
Осаждение Sc(OH)<sub>3</sub>:



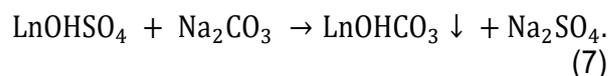
Получение оксалата скандия:



Выщелачивание РЗЭ:



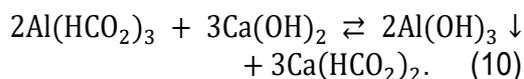
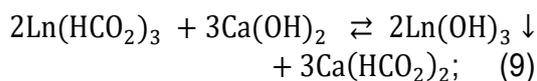
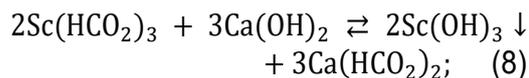
Осаждение РЗЭ:



Производственный раствор в термостате при температуре 60°C нейтрализовали известковым молоком (с концентрацией по CaO 200 г/дм<sup>3</sup>) до pH = 6,5, на нейтрализацию было израсходовано 265 мл реагента. Ниже представлены реакции нейтрализации:

**Таблица 1.** Состав производственного раствора после выщелачивания красного шлама  
**Table 1.** Composition of production solution after red mud leaching

Поток	Концентрация, г/дм <sup>3</sup>								Примечания
	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	∑редкоземельных элементов	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	
Производственный раствор	0,13	1,25	0,45	22,9	0,34	0,01	48,7	34,8	V <sub>раствора</sub> = 1,4 л



Полученную пульпу после выдержки при 60°C в течение 1 ч отфильтровали. Осадок, содержащий Al, Sc, РЗЭ, на фильтре промыли водой, результаты анализа концентрата и маточника осаждения (раствора формиатов натрия и кальция) представлены в табл. 2.

Раствор формиатов натрия и кальция перерабатывается на индивидуальные соли выпаркой раствора, формиаты кальция при повышении концентрации формиата натрия полностью переходят в твердую фазу, натриевая соль муравьиной кислоты накапливается в растворе. Концентрат Al, Sc, РЗЭ перерабатывается в оксид скандия и концен-

трат РЗЭ после перевода алюминия в раствор путем его растворения в щелочи. Редкоземельные металлы и скандий концентрируются в твердой фазе, скандий затем селективно выщелачивается из твердой фазы содо-бикарбонатным раствором с образованием водорастворимых карбонатных комплексов типа  $[\text{Sc}(\text{CO}_3)_4]^{5-}$  с карбонат-ионами  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . Концентрация реагента по  $\text{Na}_2\text{O}$  составляла 35–55 г/дм<sup>3</sup>.

Выделенный из продукционного раствора концентрат Al, Sc, РЗЭ (см. табл. 2) перерабатывается по описанной выше схеме в продукты, состав которых представлен в табл. 3.

Из скандийсодержащего раствора после добавления раствора щелочи до pH = 12,5–13,5 выделяли гидроксид скандия, который после отделения от раствора фильтрацией смешивался с раствором щавелевой кислоты при температуре 80–90°C с получением оксалата скандия по реакции (5), кислоту брали с избытком 10% от стехиометрически необходимого количества.

**Таблица 2.** Результаты анализа продуктов осаждения  
**Table 2.** Analysis results of precipitation products

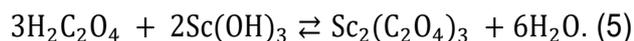
Продукт	Состав продуктов								Примечания
	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	∑редкоземельных элементов	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	
Концентрат Al, Sc, РЗЭ, %	0,3	2,89	1,04	52,9	0,79	0,023	0,7	0,3	m <sub>вл</sub> * = 173,2 г, W <sub>H<sub>2</sub>O</sub> ** = 65,0%
Маточник осаждения, г/дм <sup>3</sup>	<0,001	<0,001	0,0001	0,003	0,0001	0,002	70,9	28,5	V <sub>маточн.</sub> *** = 1,7 л

\* – масса влажной пробы, г; \*\* – влажность пробы, %; \*\*\* – объем маточника, л.

**Таблица 3.** Результаты анализа продуктов, полученных при переработке концентрата AL, Sc, редкоземельных элементов

**Table 3.** Analysis results of products obtained under processing of AL, Sc, rare earth element concentrate

Продукт	Химический состав продуктов								Примечания
	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	∑редкоземельных элементов	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	
Концентрат Sc, РЗЭ, %	2,0	18,9	6,8	34,7	5,25	0,15	4,6	1,3	m <sub>вл</sub> = 32,9 г, W <sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 72,0%
Алюминатный раствор, г/дм <sup>3</sup>	<0,001	<0,001	0,09	115,6	0,002	<0,01	0,02	155,0	V <sub>раствора</sub> = 0,25 л
Sc-содержащий раствор, г/дм <sup>3</sup>	0,53	0,01	0,003	0,019	0,001	0,015	0,001	40,0	V <sub>раствора</sub> = 0,3 л
Осадок, содержащий РЗЭ, %	0,21	19,1	6,79	35,2	5,31	0,16	4,65	0,5	m <sub>вл</sub> = 43,3 г, W <sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 79,0%



Полученный оксалат скандия прокачивали при 850<sup>0</sup>С (для удаления влаги) с получением готового продукта – оксида скандия. Состав продуктов, получаемых при переработке скандийсодержащего раствора в оксид скандия, представлен в табл. 4.

Осадок, содержащий РЗЭ, распульповывали в воде, и в полученную пульпу вводили серную кислоту. Процесс селективного выщелачивания РЗЭ контролировали по показаниям рН-метра, область рН перехода РЗЭ в раствор лежала в интервале рН = 5,0–5,5.

После отделения раствора от осадка, в котором сосредоточились все попутные примесные соединения, его нейтрализовали раствором соды до рН = 8,0–9,5, редкоземельные металлы переходили в осадок в виде карбонатных солей, которые после промывки и сушки представляли собой концентрат редкоземельных металлов.

Состав продуктов, получаемых при переработке осадка, содержащего РЗЭ, представлен в табл. 5.

Извлечение скандия и редкоземельных

металлов из производственного раствора формиатного выщелачивания красного шлама составило 98–99%, алюминия, кальция и натрия – 99%. Предлагаемая технология переработки данных формиатных растворов является новым технологическим решением, ранее не исследованным. Красный шлам перерабатывали либо щелочными способами [18, 19], либо с использованием неорганических кислот [20, 21], либо пирометаллургическими методами [15, 22]. На данную технологию на сегодняшний день уже готов патент на изобретение.

В предлагаемой технологии при сопоставимых затратах на энергию, оборудование, реагенты и материалы по сравнению с известными разработками [23, 24] из растворов после выщелачивания кроме скандия получают и другие ценные продукты с высокой добавочной стоимостью: концентрат РЗЭ, алюминий, формиаты кальция и натрия. Комплексный подход к переработке формиатных растворов является экономически целесообразным, что может существенно повысить технико-экономические показатели предложенной технологии.

**Таблица 4.** Результаты анализа продуктов, полученных при переработке скандийсодержащего раствора в оксид скандия

**Table 4.** Analysis results of products obtained under processing of scandium-containing solution into scandium oxide

Продукт	Состав продуктов								Примечания
	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	∑редкоземельных элементов	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	
Концентрат Sc, %	45,2	0,5	0,03	1,7	0,05	1,29	0,06	10,3	m <sub>вл</sub> = 3,5 г, W <sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 90,0%
Маточник осаждения оксалата, г/дм <sup>3</sup>	0,10	0,05	0,001	0,06	0,002	0,045	0,002	0,36	V <sub>раствора</sub> = 0,1 л
Оксид скандия Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	99,0	0,90	0,001	0,0024	0,008	0,002	0,0016	0,06	–

**Таблица 5.** Результаты анализа продуктов, полученных при переработке содержащего осадка редкоземельных элементов

**Table 5.** Analysis results of products obtained under processing of sediment containing rare earth elements

Продукт	Химический состав продуктов								Примечания
	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	∑редкоземельных элементов	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	
Концентрат РЗЭ, %	0,5	56,1	0,03	0,007	0,05	0,009	0,06	0,3	m <sub>вл</sub> = 5,16 г, W <sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 40,0%
Маточник осаждения РЗЭ, г/дм <sup>3</sup>	<0,001	<0,001	0,009	0,002	0,002	<0,01	0,001	5,0	V <sub>раствора</sub> = 0,5 л
Нерастворимый осадок в отвал, %	0,014	0,2	8,83	45,7	6,86	0,21	6,16	0,6	m <sub>вл</sub> = 12,7 г, W <sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 45,0%

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана принципиальная возможность переработки производственных растворов, полученных после проточного выщелачивания красного шлама формиатным способом, в высоколиквидные продукты с высокой добавочной стоимостью. Выполнено описание химических процессов, осуществляемых на основных технологических переделах комплексного способа переработки растворов

после проточного выщелачивания красного шлама формиатным методом. Разработана технологическая схема переработки производственных растворов формиатного выщелачивания красного шлама с получением товарных продуктов. Извлечение из производственного раствора скандия, редкоземельных металлов составило 98–99%, алюминия, формиатов кальция и натрия – 99%.

## Список источников

1. Dubovikov O. A., Brichkin V. N., Ris A. D., Sundurov A. V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // *Non-ferrous Metals*. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>.
2. Власов А. А., Сизяков В. М., Бажин В. Ю. Использование глинозема песчаного типа для производства алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 6. С. 111–118. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-111-118>.
3. Александров А. В., Немчинова Н. В. Расчет ожидаемой экономической эффективности производства алюминия за счет увеличения применения глинозема отечественного производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 408–420. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>.
4. Бажин В. Ю., Смольников А. Д., Петров П. А. Концепция энергоэффективного производства алюминия «Электролиз 600+» // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 5. Ч. 3. С. 37–40. <https://doi.org/10.18454/IJR.2016.47.113>.
5. Gorlanov E. S., Bazhin V. Yu., Vlasov A. A. Electrochemical borating of titanium-containing carbographite materials // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017. Vol. 2017. No. 6. P. 489–493. <https://doi.org/10.1134/S003602951706009X>.
6. Немчинова Н. В., Тютрин А. А., Бараускас А. Э. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки // *Цветные металлы*. 2019. № 12. С. 22–29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>.
7. Петлин И. В., Малютин Л. Н. Технология комплексной переработки фторсодержащих отходов алюминиевой промышленности с целью получения фторида водорода // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2014. Т. 7. № 2. С. 24–31.
8. Гуляев А. В., Гавриленко Л. В., Баранов А. Н., Ножко С. И. Утилизация твердых углеродсодержащих отходов на алюминиевом заводе, оснащённом электролизерами с самообжигающимися анодами с верхним токоподводом // *Экология и промышленность России*. 2017. Т. 21. № 5. С. 8–10. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-5-8-10>.
9. Немчинова Н. В., Сомов В. В., Тютрин А. А. Определение оптимальных параметров выщелачивания фтора из угольной части отработанной футеровки демонтированных электролизеров производства алюминия // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 544–549. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.544>.
10. Belskii S. S., Chantsev M. V. Industrial production technology for aluminium paste // *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. P. 847–852. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.847>.
11. Подгородецкий Г., Ширяева Е., Горбунов В., Козлова О. Проблема эффективной переработки красных шламов, поиск решений // *Экология и промышленность России*. 2015. № 12. Т. 19. С. 46–53. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-12-46-53>.
12. Трушко В. Л., Утков В. А., Бажин В. Ю. Актуальность и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // *Записки Горного института*. 2017. Т. 227. С. 547–553. <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.547>.
13. Утков В. А., Сизяков В. М. Современные вопросы металлургической переработки красных шламов // *Записки Горного института*. 2013. Т. 202. С. 39–43.
14. Khairul M. A., Zanganeh J., Moghtaderi B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud // *Resources Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 141. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.006>.
15. Зиновеев Д. В., Грудинский П. И., Дюбанов В. Г., Коваленко Л. В., Леонтьев Л. И. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 11. С. 843–858. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-843-858>.
16. Wang Shaohan, Jin Huixin, Deng Yong, Xiao Yundan. Comprehensive utilization status of red mud in China: a critical review // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 289. P. 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125136>.
17. Mohapatra A., Bose P., Pandit S. S., Kumar S., Alex T. C. Bulk utilization of red mud in geopolymer based products // *Advances in Sciences and Engineering*. 2020. Vol. 12. No. 2. P. 86–91. <https://doi.org/10.32732/ase.2020.12.2.86>.
18. Пат. № 2245371, Российская Федерация, С2,

C21B3/04. Способ переработки красного шлама глиноземного производства / Е. А. Коршунов, С. П. Буркин, Ю. Н. Логинов, И. В. Логинова, Е. А. Андриякова, В. С. Третьяков; заявитель и патентообладатель ООО «ДАТА-ЦЕНТР». Заявл. 03.02.2003; опубл. 27.01.2005. Бюл. № 3.  
19. Пат. № 2692709, Российская Федерация, С2, С22В 59/00. Способ извлечения скандия из красного шлама глиноземного производства / А. Б. Козырев, О. В. Петракова, А. Г. Сусс, С. Н. Горбачев, А. В. Панов; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ. Инженерно-технологический центр». Заявл. 21.06.2017; опубл. 26.06.2019. Бюл. № 18.  
20. Xiao Junhui, Peng Yang, Ding Wei, Chen Tao, Zou Kai, Wang Zhen. Recovering scandium from scandium rough concentrate using roasting-hydrolysis-leaching process // *Green Separation and Extraction Processes*. 2020. Vol. 8. No. 3. P. 365–380. <https://doi.org/10.3390/pr8030365>.  
21. Иванков С. И., Скобелев К. Д., Шубов Л. Я., Доронкина И. Г. Систематизация многотоннажных отходов и запатентованные технологии их утилизации и перера-

ботки // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. Обзорная информация/ Всероссийский институт научной и технической информации РАН. М.: Изд-во ВИНТИ РАН, 2020. Вып. 1. С. 2–118. <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2020-01-1>.  
22. Скобелев Д. О., Марьев В. А., Шубов Л. Я., Иванков С. И., Доронкина И. Г. Отходы горно-металлургической отрасли: систематизация технологических решений экологических задач (Часть II) // *Экологические системы и приборы*. 2019. № 1. С. 12–37. <https://doi.org/10.25791/esip.01.2019.401>.  
23. Киров С. С., Хайруллина П. Т., Сусс А. Г., Александров П. В. Осаждение Sc-концентрата из растворов карбонатно-бикарбонатного выщелачивания известковым молоком с последующей серноокислотной перемывкой Ca – Sc-осадков // *Цветные металлы*. 2017. № 1. С. 46–52. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.08>.  
24. Пягай И. Н. Блочная переработка бокситовых шламов глиноземного производства // *Цветные металлы*. 2016. № 7. С. 43–51. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.07.05>.

### References

1. Dubovikov O. A., Brichkin V. N., Ris A. D., Sundurov A. V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-Ferrous Metals*. 2018;2:11-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>.  
2. Vlasov A. A., Sizyakov V. M., Bazhin V. Yu. Use of sandy alumina for aluminum production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(6):111-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-6-111-118>.  
3. Aleksandrov A. V., Nemchinova N. V. Calculation of the expected economic efficiency of aluminium production by increasing the use of domestic alumina. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):408-420. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>.  
4. Bazhin V. U., Smol'nikov A. D., Petrov P. A. Concept of energy efficiency aluminum production "Electrolysis 600+". *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*. 2016;5(3):37-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.113>.  
5. Gorlanov E. S., Bazhin V. Yu., Vlasov A. A. Electrochemical borating of titanium-containing carbographite materials. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2017;2017(6):489-493. <https://doi.org/10.1134/S003602951706009X>.  
6. Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Barauskas A. E. Analysing the chemical composition of man-made materials resultant from the production of primary aluminium in order to find cost-effective recycling techniques. *Tsvetnye Metally*. 2019;12:22-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>.  
7. Petlin I. V., Malyutin L. N. Hydrogen fluoride producing

technology from aluminum industry fluorine-containing waste products. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2014;7(2):24-31. (In Russ.).  
8. Gulyaev A. V., Gavrilenko L. V., Baranov A. N., Nozhko S. I. Recovery of solid carbonaceous wastes at an aluminium plant equipped with electrolyte tanks with self-baking anode with an upper current lead. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(5):8-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-5-8-10>.  
9. Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Somov V. V. Determination of optimal fluorine leaching parameters from the coal part of the waste lining of dismantled electrolytic cells for aluminum production. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;239:544-549. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.544>.  
10. Belskii S. S., Chantsev M. V. Industrial production technology for aluminium paste. *Defect and Diffusion Forum*. 2021;410:847-852. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.847>.  
11. Podgorodetsky G., Shiryaeva E., Gorbunov V., Kozlova O. A Problem of efficient red mud processing, search for solutions. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(12):46-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-12-46-53>.  
12. Trushko V. L., Utkov V. A., Bazhin V. Y. Topicality and possibilities for complete processing of red mud of aluminous production. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2017;227:547-553. <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.547>.  
13. Utkov V. A., Sizyakov V. M. Modern issues of metallurgical processing of red mud. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2013;202:39-43. (In Russ.)  
14. Khairul M. A., Zanganah J., Moghtaderi B. The com-

position, recycling and utilisation of Bayer red mud. *Resources Conservation and Recycling*. 2019;141:483-498. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.006>.

15. Zinoveev D. V., Grudinskii P. I., Dyubanov V. G., Kovalenko L. V., Leont'ev L. I. Global recycling experience of red mud – A review. Part I: pyrometallurgical methods. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiyazvestiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(11):843-858. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-843-858>.

16. Wang Shaohan, Jin Huixin, Deng Yong, Xiao Yuandan. Comprehensive utilization status of red mud in China: a critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2021;289:125-136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125136>.

17. Mohapatra A., Bose P., Pandit S. S., Kumar S., Alex T. C. Bulk utilization of red mud in geopolymer based products. *Advances in Sciences and Engineering*. 2020;12(2):86-91. <https://doi.org/10.32732/ase.2020.12.2.86>.

18. Korshunov E. A., Burkin S. P., Loginov Yu. N., Loginova I. V., Andryukova E. A., Tret'yakov V. S. *Processing method of red mud of alumina production*. Patent RF, no. 2245371; 2005. (In Russ.).

19. Kozyrev A. B., Petrakova O. V., Suss A. G., Gorbachev S. N., Panov A. V. *Method of scandium extraction from red mud of alumina production*. Patent RF, no. 2692709; 2017. (In Russ.).

20. Xiao Junhui, Peng Yang, Ding Wei, Chen Tao, Zou Kai, Wang Zhen. Recovering scandium from scandium

rough concentrate using roasting-hydrolysis-leaching process. *Green Separation and Extraction Processes*. 2020;8(3):365-380. <https://doi.org/10.3390/pr8030365>.

21. Ivankov S. I., Skobelev K. D., Shubov L. Ya., Doronkina I. G. Systematization of large-tonnage waste and patented technologies for their utilization and recycling. In: *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchej sredy. Obzornaya informaciya/ Vserossijskij institut nauchnoj i tekhnicheskoy informacii RAN = Scientific and technical aspects of environmental protection. Overview information*. Moscow: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences; 2020, no. 1, p. 2-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2020-01-1>.

22. Skobelev D. O., Maryev V. A., Shubov L. Ya., Ivankov S. I., Doronkina I. G. Waste from the mining and metallurgy industry: the systematization of the technological solutions of the ecological tasks. Part II. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*. 2019;1:12-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/esip.01.2019.401>.

23. Kirov S. S., Khayrullina R. T., Suss A. G., Aleksandrov P. V. Scandium concentrate precipitation from carbonate-bicarbonate solutions with calcium hydroxide. *Tsvetnye Metally*. 2017;1:46-52. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.08>.

24. Pyagay I. N. The block processing of red mud of alumina production. *Tsvetnye Metally*. 2016;7:43-51. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.07.05>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Сизяков Виктор Михайлович,**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры металлургии,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,  
Россия

##### **Козырев Борис Александрович,**

аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,  
Россия

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 01.09.2021; одобрена после рецензирования 17.09.2021; принята к публикации 26.09.2021.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Viktor M. Sizyakov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Metallurgy,  
St. Petersburg Mining University,  
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

##### **Boris A. Kozyrev,**

Postgraduate Student,  
St. Petersburg Mining University,  
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Information about the article**

The article was submitted 01.09.2021; approved after reviewing 17.09.2021; accepted for publication 26.09.2021.