

**ТЕХНОЛОГИЯ РЕДКИХ, РАССЕЯННЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
TECHNOLOGY OF RARE, SCATTERED AND RADIOACTIVE ELEMENTS**

Научная статья

УДК 669.85/.86

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-42-55

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КРАСНОГО ШЛАМА**

Карапузикова Александра Александровна<sup>1</sup>, Галкова Людмила Ивановна<sup>1</sup>,  
Крылов Алексей Андреевич<sup>1</sup>, Гуляева Роза Иосифовна<sup>1</sup>, Рычков Владимир Николаевич<sup>2</sup>,  
Боталов Максим Сергеевич<sup>2</sup>, Кириллов Евгений Владимирович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения

Российской академии наук

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

\* для корреспонденции: Karapuzikovaalexandra@mail.ru

**Информация о статье**

Поступила:

10 июля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

19 марта 2026 г.

**Ключевые слова:**

РЗЭ, красный шлак, обжиг,  
карбонат натрия, РФА,  
дифференциально-  
термический анализ,  
выщелачивание

**Аннотация.**

Красный шлак (КШ) – это отход, образующийся в производстве глинозема по методу Байера. Масштабы его образования эквивалентны объему товарной продукции, составляя в среднем 1,1 – 1,2 т на 1 т глинозема. В настоящее время КШ не перерабатывается и используется в небольших объемах. КШ содержат основные ценные элементы (алюминий, железо, титан, кальций, кремний, свободная щелочь) и являются источником редких и редкоземельных элементов, концентрации которых в шламе пригодны для промышленного извлечения. Настоящая работа направлена на расширение данных по выщелачиванию РЗЭ из КШ серной кислотой. Интерес представляет предложенный способ низкотемпературного обжига КШ с карбонатом натрия с последующим выщелачиванием продукта обжига серной кислотой. Изучено влияние добавок карбоната натрия при обжиге КШ и параметров выщелачивания: рН раствора, температура и продолжительность. Методом рентгенофазового анализа определен состав исходного образца КШ и продуктов его обжига с карбонатом натрия. Методом дифференциально-термического анализа с последующим РФА продуктов термообработки определены термические превращения при нагреве КШ и его смеси с  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Установлено, что обжиг КШ с карбонатом натрия положительно сказывается на выщелачивании. Суммарное извлечение РЗЭ повысилось на 10-15%. Кроме того, выщелачивание обожженной смеси способствует предотвращению образования силикагеля. Наибольшее влияние оказывают кислотность раствора и температура. Извлечение Sc и Dy в раствор достигает 90%, а La и Ce – около 50%. Отмечено, что выщелачивание без нагрева приводит к снижению растворимости алюминия (с 55 до 35%) и железа, которое практически не переходит в раствор.

**Для цитирования:** Карапузикова А.А., Галкова Л.И., Крылов А.А., Гуляева Р.И., Рычков В.Н., Боталов М.С., Кириллов Е.В. Извлечение редкоземельных элементов из красного шлама // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 1 (173). С. 42-55. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-42-55, EDN: YKHQFD

### Введение

При переработке бокситов на глинозем по способу Байера образуется красный шлам, представляющий собой высокодисперсную трудно фильтруемую пульпу, содержащую щелочные гидроалюмосиликаты, оксиды и гидроксиды железа, титана, кальция, кремния, свободную щелочь и другие макро- и микрокомпоненты [1].

Масштабы образования красного шлама эквивалентны объему товарной продукции, составляя в среднем 1,1 – 1,2 т на 1 т глинозема. Так, только глиноземные заводы Урала (Россия) производят в год до 2 млн т красного шлама, который практически не утилизируется и сбрасывается в шламохранилище [2], являясь при этом одним из значимых техногенных источников редкоземельных элементов.

В мировой практике в последние десятилетия развиваются четыре основных подхода к решению проблемы утилизации красного шлама [3-5]. Первый включает пирометаллургические способы, такие как восстановительная плавка и обжиг, микроволновое карботермическое восстановление и многоступенчатая магнитная сепарация [6-8], которые направлены главным образом на крупномасштабное извлечение железа и алюминия с целью использования их в черной металлургии, что требует высоких капитальных затрат, так как все это является весьма трудо- и энергоемким. При этом извлечение ценных микрокомпонентов либо рассматривается в минимальных масштабах, либо не предусматривается вовсе.

В основе второго направления утилизации красного шлама лежит необходимость доизвлечения алюминия и щелочи. Этот подход ориентирован на повышение эффективности основного производства. Способ хоть и позволяет уменьшить количество отходов и уровень их опасности, но не решает основной проблемы – полной утилизации [9, 10].

Третий метод предполагает использование красного шлама в качестве сырья для получения строительных материалов [11] и других продуктов, используемых в народном хозяйстве, таких как сорбенты [12], полимеры [13], катализаторы [14].

Комплексное извлечение ценных компонентов может быть составной частью трех вышеперечисленных способов и объединяет гидрометаллургические способы, ориентированные на извлечение из красного шлама редких и редкоземельных элементов. Такой подход в настоящее время представляет особый интерес, т. к. красный шлам рассматривается во всем мире как источник важных для высокотехнологической промышленности металлов, таких как скандий, титан, галлий, редкоземельные элементы,

концентрации которых в шламе пригодны для промышленного извлечения [15, 16].

Разработано множество вариантов комплексной переработки красных шламов с получением из них широкого ассортимента ликвидных продуктов. Однако до настоящего времени комплексная переработка КШ с утилизацией всех компонентов не внедрена ни на одном предприятии, производящем этот отход. Основной причиной этого является сложность объединения гидрометаллургических процессов извлечения из КШ редких металлов и пирометаллургии, необходимой для восстановительной плавки железа, составляющего более 40% красных шламов. Поэтому в настоящее время основное внимание исследователей [17, 18] уделено извлечению из КШ наиболее ценных компонентов, таких как скандий, РЗЭ, цирконий, галлий, остаточный алюминий гидрометаллургическими методами, оставляя железосодержащую часть в качестве нового отхода.

Сущность гидрометаллургических технологий извлечения РЗЭ в общем виде сводится к растворению красного шлама в кислотных либо щелочных растворах с последующим осаждением или отделением целевых компонентов и соединений из жидкой фазы такими способами, как сорбция [19, 20] и экстракция [21].

Среди известных способов выделяются методы карбонатного [17, 18] и кислотного выщелачивания РЗЭ [22-25]. Первый заключается в карбонизационном выщелачивании КШ с использованием водных растворов карбоната или гидрокарбоната натрия, а также с применением барботажа  $\text{CO}_2$ , с переводом в раствор скандия и некоторых других РЗЭ, которые склонны к образованию растворимых устойчивых комплексных карбонатных соединений [18, 26]. При карбонизации происходит нейтрализация гидроксида натрия, содержащегося в КШ, что является преимуществом метода, перевод  $\text{NaOH}$  в  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , а затем в  $\text{NaHCO}_3$ , в результате чего наблюдается увеличение растворимости РЗЭ (особенно тяжелой группы) [26]. Однако метод осложнен протеканием щелочного гидролиза и гидролитической полимеризации гидрокарбонатов скандия, алюминия и др., что сопровождается образованием вторичных осадков и снижением выхода целевых элементов в карбонатный раствор [27].

Наиболее полного извлечения редких металлов из красного шлама можно добиться применением минеральных кислот [23-25]. Авторы [23] описали способ извлечения до 80% скандия из КШ канадского боксита в очень жестких условиях: выщелачивание водой после сульфатизирующего обжига с

концентрированной серной кислотой при 400°C. Имеются литературные данные [24] по выщелачиванию РЗЭ из шламового остатка греческого боксита с использованием различных кислот. Более высокое извлечение РЗЭ (около 70-80%) достигнуто при выщелачивании крепкой 6N соляной кислотой в течение 24 ч при температуре 25°C. Однако растворение железа было также высоким (60%). Авторы подтвердили тесную связь скандия в красных шламах с фазами оксида железа. Использование серной кислоты позволяет перерабатывать любые КШ с высокой степенью извлечения редких металлов в раствор. К тому же она является относительно дешевым реагентом, коррозионноустойчивая, предупреждает переход железа из КШ в раствор и не требует специальной футеровки оборудования.

Большинство литературных источников посвящено извлечению скандия и очень мало – другим РЗЭ. Настоящая работа направлена на расширение данных по выщелачиванию РЗЭ из красных шламов серной кислотой с ограничением на начальном этапе перевода в раствор алюминия и железа, которые останутся в нерастворимом остатке. Было изучено влияние добавок карбоната натрия на обжиг КШ, а также влияние различных параметров выщелачивания, таких как pH раствора, температура и продолжительность.

#### Методика проведения исследования

В исследовании использовали красный шлак ОАО УАЗ-СУАЛ (г. Каменск-Уральский Свердловской области). Химический состав шлама представлен в Таблице 1.

Общее содержание РЗЭ – около 0,1 масс. %. Образец более богат легкими РЗЭ, чем тяжелыми. Большую долю занимают металлы цериевой группы – лантан и церий, соответственно 0,029 и 0,065%, далее следует металл из тяжелой группы элементов – диспрозий, 0,0030%.

Исходный образец шлама характеризовался отношением твердого к жидкости (т:ж) 1:2 (влажность 66,6%) и pH 12. Перед экспериментами была проведена следующая обработка образца с целью устранения влияния свободной щелочи в суспензии красного шлама. Образец КШ фильтровали с помощью

вакуумного фильтра, суспензировали в дистиллированной воде и снова фильтровали. Процедуру повторяли несколько раз для снижения значения pH фильтрата. После промывки шлама он оставался на уровне 9 и не снижался. Это связано с тем, что большая часть натрия находится в форме нерастворимых алюмосиликатов, и промывка водой не очень эффективна для нейтрализации КШ перед кислотным выщелачиванием. Образец промытого КШ извлекали из фильтра, сушили до влажности 3% и хранили в эксикаторе.

Для определения фазового состава продуктов спекания применяли рентгенофазовый анализ (РФА) с использованием дифрактометра Shimadzu XRD-7000, CuK $\alpha$  – излучение. Для расшифровки дифрактограмм использована база данных ICDD PDF-2 [28]. Термический анализ измельченных (крупность менее 0,1 мм) материалов (навеска 40-50 мг) выполнен на приборе Netzsch STA 449 C Jupiter при непрерывном нагреве образцов, помещенных в алундовый тигель. Измерения проведены методом совмещенной термогравиметрии (ТГ) и дифференциально-термического анализа (ДТА). Нагрев до 800-900°C вели со скоростью 10°C/мин в потоке (50 см<sup>3</sup>/мин) воздуха.

Элементный состав твердых фаз определяли с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра. Химический анализ всех растворов проводили методом масс-спектрометрии на масс-спектрометре NexION 350X (Perkin Elmer, США).

Для лучшего вскрытия КШ с целью извлечения из них РЗЭ была предложена двухстадийная схема, включающая обжиг КШ с карбонатом натрия с последующим выщелачиванием продукта обжига серной кислотой. В литературе нет информации о влиянии обжига КШ с карбонатом натрия.

Эксперименты проводили для изучения влияния соотношения КШ и карбоната натрия при обжиге, а также влияния pH, температуры и продолжительности последующего выщелачивания продуктов обжига. Для оценки эффективности обжига КШ с карбонатом натрия был использован метод изотермического нагрева, когда исходные компоненты (КШ и карбонат натрия в заданном соотношении)

Таблица 1. Химический состав красного шлама

Table 1. Chemical composition of red sludge

Элемент, масс %													
Na	Al	Ca	Sc	Ti	Fe	Y	Zr	Mo	ΣРЗЭ				
2,7	7,7	6,6	0,9·10 <sup>-2</sup>	2,3	28,7	0,1·10 <sup>-1</sup>	0,2·10 <sup>-1</sup>	0,2·10 <sup>-1</sup>	0,1				
Содержание РЗЭ, масс %													
La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
0,03	0,06	0,007	0,02	0,004	0,0009	0,004	0,0006	0,003	0,0007	0,002	0,0004	0,002	0,004

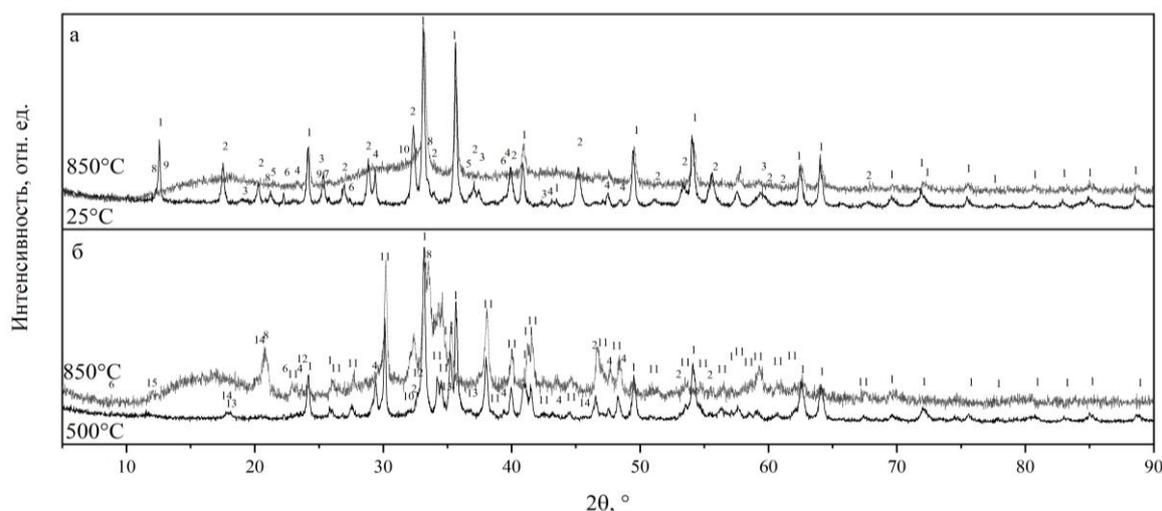


Рис. 1. Дифрактограммы красного шлама (25 °С) и продукта его нагрева (10 град /мин) до 850 °С (а), а также продуктов термообработки смеси КШ с Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> при 500 °С в течение 1 часа и нагрева (10 град /мин) до 850 °С (б). Фазовый состав – в Таблице 2.

Fig. 1. Diffractograms of red sludge (25 °C) and the product of its heating (10 degrees /min) to 850 °C (a), as well as the products of heat treatment of a mixture of RS with Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> at 500 °C for 1 hour and heating (10 degrees /min) to 850 °C (b). The phase composition is shown in Table 2.

Таблица 2. Фазовый состав КШ и продукта термообработки КШ с Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (к Рис. 1)  
Table 2. Phase composition of RS and RS heat treatment product with Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (to Fig. 1)

№ фазы по рис. 1	Название фазы	Химическая формула	Фазовый состав, % масс.	
			КШ (25 °С)	КШ + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (500 °С)
1	Iron Oxide	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48,3	46,7
2	Calcium Aluminum Silicate Hydroxide	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )(OH) <sub>8</sub>	22,6	2,3
3	Iron Aluminum Silicate Hydroxide	(Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Al) <sub>3</sub> (Si, Al) <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	7,6	-
4	Calcium Carbonate	CaCO <sub>3</sub>	8,63	10,6
5	Iron Oxide Hydroxide	FeO(OH)	3,2	-
6	Silicon Oxide	SiO <sub>2</sub>	2,2	3,0
7	Sodium Calcium Aluminum Silicate Carbonate	(Ca, Na) <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>6</sub> O <sub>12</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>0,5</sub>	1,8	-
8	Magnesium Silicate Hydroxide	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	1,9	-
9	Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide	(Mg <sub>4,15</sub> Al <sub>1,85</sub> )(Si <sub>2,15</sub> Al <sub>1,85</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>	1,6	-
10	Iron Titanium Oxide	FeTiO <sub>3</sub>	2,2	1,6
11	Sodium Carbonate	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-	27,9
12	Titanium Oxide	Ti <sub>1,85</sub> O <sub>3</sub>	-	2,5
13	Calcium Aluminum Oxide	Al <sub>14</sub> Ca <sub>12</sub> O <sub>33</sub>	-	2,0
14	Calcium Aluminum Hydrogen Oxide	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (O <sub>4</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-	2,1
15	Sodium Titanium Oxide Silicate	Na <sub>2</sub> (Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ))	-	1,3

тщательно перемешивали и помещали в тигель, который устанавливали в разогретую муфельную печь. Термообработку вели при температуре 500°C в течение 1 часа при соотношении  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ} = 1$ : (1-8). Продукт обжига выщелачивали серной кислотой при непрерывном перемешивании, требуемом рН среды, отношении т/ж = 1:20 в течение 1 часа при заданной температуре. Перемешивание суспензии осуществляли на магнитной мешалке, контроль значения рН вели с помощью рН-метра. Влияние температуры на степень выщелачивания РЗЭ изучали в термостатированном реакторе. Пульпу фильтровали на вакуум-фильтре с использованием бумажного фильтра «синяя лента». О полноте реакций судили по степени перехода РЗЭ в раствор, которую определяли по уравнению:

$$\alpha = 100 \cdot C \cdot \frac{V}{m}$$

где  $C$  – концентрация РЗЭ в растворе, г/дм<sup>3</sup>;  $V$  – объем раствора, дм<sup>3</sup>;

$m$  – масса РЗЭ в КШ, г.

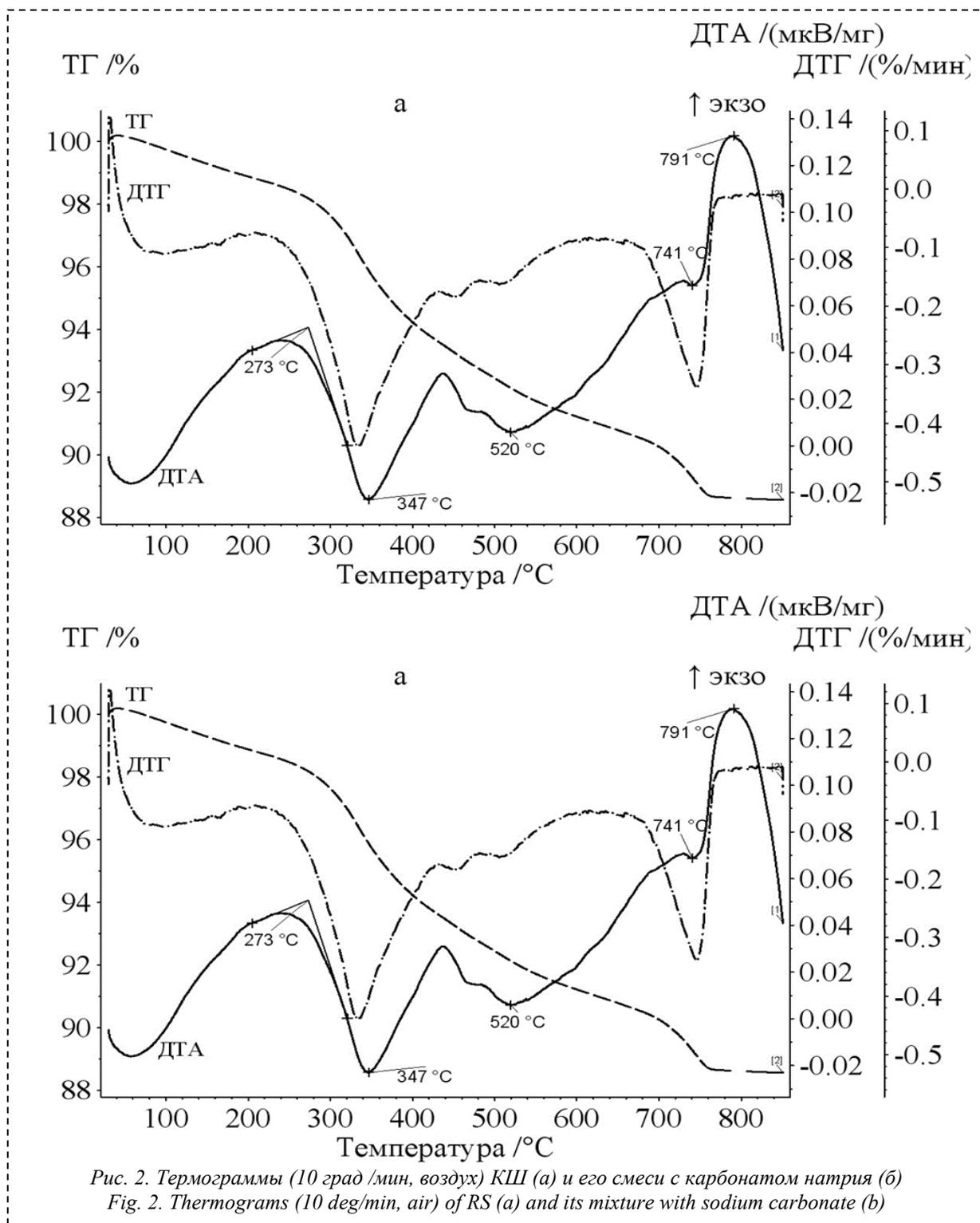
#### Результаты и их обсуждение

Химический и минеральный состав КШ изучен достаточно подробно. В литературе нет единого мнения относительно кристаллохимических особенностей поведения РЗЭ при переработке КШ гидрохимическими способами. Согласно литературным данным, скандий и остальные РЗЭ встречаются в составе КШ в различных минеральных формах. РЗЭ встречаются в отдельных минеральных частицах, часто состоящих из титана и железа, а также в составе сложных алюмосиликатов [6]. Церий может присутствовать в фазе оксида или баэнезита ( $\text{Ce,LaCO}_3\text{F}$ ) и его трудно выщелачивать. Скандий присутствует в основном в железосодержащих фазах КШ, замещая в решетке  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ , и также ассоциирован с  $\text{Ti}$ . Частично скандий присутствует в богатых кремнием минералах, таких как кварц и цеолит (каркасные алюмосиликаты).

По результатам РФА (Рис. 1) исходный шлам содержит преобладающее количество (более 50%) железосодержащих фаз – гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и гетит ( $\text{FeO(OH)}$ ). Сложные алюмосиликаты кальция и железа ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$  и  $(\text{Fe}^{+2}, \text{Fe}^{+3}, \text{Al})_3(\text{Si,Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) близки по составу к таким минералам, как катоит и шамозит. В шламе выявлены канкринит и кальцит, а также в небольшом количестве силикаты и алюмосиликаты магния. Диоксид кремния, помимо ассоциированного в минералы, выявлен в виде частиц кварца. Идентифицировать фазы редкоземельных металлов из-за их низкой концентрации было затруднительно. Фазовый состав КШ приведен в Таблице 2.

Методом дифференциально-термического анализа (Рис. 2) с последующим РФА продуктов термообработки определены термические превращения при нагреве красного шлама в токе воздуха. На кривой ДТА имеется ряд слабо выраженных эндотермических эффектов. Наличие пика в интервале до 100°C свидетельствует об удалении свободной воды, что сопровождается небольшим снижением массы образца (1,36%). Наличие пиков в диапазоне температур 300-600°C может свидетельствовать о разложении гидроксидов в разных стадиях (гетита, между 300 и 400°C) и дегидратации высокоосновных гидроалюмосиликатов до более низкоосновных форм соединений. При этом кривая изменения массы (ТГ) обусловлена постепенным выделением воды и соединений. Убыль массы в интервале температур от 400 до 750°C составляет 7,73%, и при дальнейшем нагреве масса образца практически не меняется, что свидетельствует об окончании процесса дегидратации. Общее снижение массы при нагреве до 850°C составляет 11,64%. На дифрактограмме образца после термообработки (Рис. 1) основная часть выявленных линий отвечает оксиду железа (гематиту). Также в небольших количествах идентифицированы алюмосиликат кальция, силикат магния и карбонат кальция.

Для анализа процессов в системе красный шлам – карбонат натрия количество реагентов взято в соотношении  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ} = 1$ :1. По данным о фазовом составе продукта обжига КШ с карбонатом натрия судили о возможных фазовых превращениях. На кривой ДТА (Рис. 2) зафиксирован ряд эндотермических эффектов. Убыль массы образца (3,99%) и эндотермический эффект с началом около 85 и минимумом при 106°C отражает дегидратацию исходных материалов ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и КШ). Эффекты при 351 и 541°C связаны с разложением оксидов и гидроксидов, в частности гетита, а также дегидратации гидроалюмосиликатов. При этом наблюдается непрерывная небольшая убыль массы образца. При температурах выше 612°C скорость снижения массы (ДТГ) резко увеличивается. Как известно из литературных источников [29], при термическом воздействии у алюможелезистых силикатов происходят структурные нарушения в температурном интервале 620-800°C, который совпадает с температурным интервалом процесса декарбонизации  $\text{CaCO}_3$ . Образовавшиеся продукты характеризуются высокой реакционной активностью и взаимодействуют с образованием новых фаз алюминатов, феррита и силиката. Щелочные примеси интенсифицируют процесс декарбонизации. Эндотермический процесс удаления  $\text{CO}_2$  смещается до 750-760 °C.



Начиная с эндозффекта при 746°C снижение массы образца продолжается до конца опыта (850°C).

В результатах РФА (Рис. 1, Таблица 2) просматриваются описанные выше процессы. В продукте изотермического обжига КШ с карбонатом натрия при температуре 500°C идентифицированы гематит (основная фаза) и кальцит. В небольших количествах найдены алюмосиликат и алюминат кальция, кварц,

разные соединения титана – оксид, феррит, натриевый силикат. На дифрактограмме образца смеси после ДТА при непрерывном нагреве до 850°C также выделяется основная фаза – оксид железа (гематит). Выявлены карбонаты кальция и натрия, кварц, гидросиликат магния и алюминат кальция, соединения титана – оксид и натриевый силикат.

Эксперименты по предварительному обжигу КШ с карбонатом натрия в изотермических

Таблица 3. Результаты выщелачивания серной кислотой исходного КШ и после обжига с карбонатом натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}=1$ ,  $\text{pH}=2$ ,  $t=90^\circ\text{C}$ ,  $\tau=1$  час)  
 Table 3. Results of leaching with sulfuric acid of the initial RS and after firing with sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{RS}=1$ ,  $\text{pH}=2$ ,  $t=90^\circ\text{C}$ ,  $\tau=1$  hour)

Элемент	Степень извлечения РЗЭ, %	
	Из исходного КШ	После обжига с $\text{Na}_2\text{CO}_3$
Sc	61,49	69,54
Y	84,38	93,9
La	39,18	46,27
Ce	35,11	48,64
Pr	54,57	64,24
Nd	53,86	61,88
Sm	72,55	83,81
Eu	65,21	70,04
Gd	75,99	82,06
Tb	64,19	65,77
Dy	80,82	85,52
Ho	65,85	64,73
Er	76,73	76,06
Tm	51,77	56,02
Yb	81,75	81,08
Lu	51,41	56,95

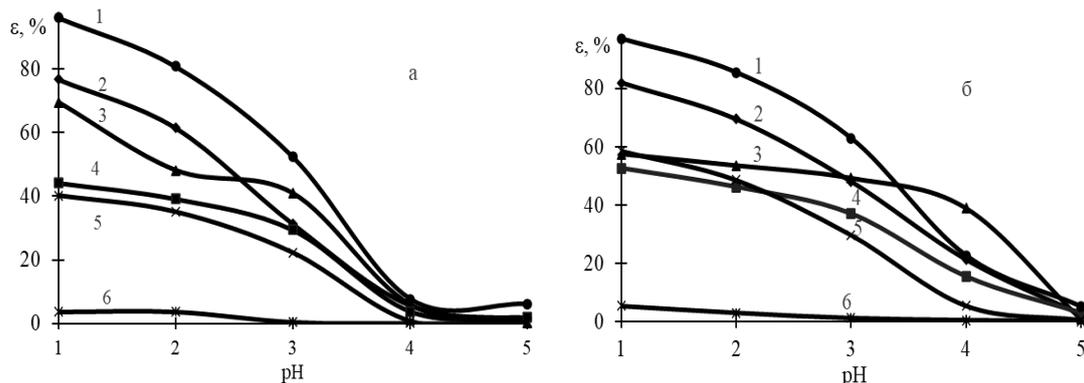


Рис. 3. Зависимость извлечения РЗЭ, Al и Fe от обжига КШ и кислотности раствора (а – без обжига, б – соотношение  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}=1$ ,  $t=90^\circ\text{C}$ ,  $\tau=1$  час)

Fig. 3. Dependence of the extraction of REE, Al and Fe on the roasting of RS and the acidity of the solution (a – without roasting, b – the ratio of  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{RS}=1$ ,  $t=90^\circ\text{C}$ ,  $\tau=1$  hour)

1 – Dy, 2 – Sc, 3 – Al, 4 – La, 5 – Ce, 6 – Fe

( $500^\circ\text{C}$ ) условиях проводили при отношении  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}=1$  : (1-8). Продукты обжига подвергнуты выщелачиванию серной кислотой. По данным химического анализа проведена оценка извлечения в раствор РЗЭ и других металлов, что является критерием эффективности процесса. Сравнение результатов выщелачивания исходного КШ и после обжига с карбонатом натрия показало некоторые преимущества последнего. Процесс вели в жестких условиях: при обжиге отношение  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}=1$  выщелачивали крепкой серной кислотой ( $\text{pH}=2$ ) при температуре  $90^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. Максимальное суммарное извлечение РЗЭ увеличилось с 48,7 до 58,7% (Таблица 3).

Другим важным фактором является состояние раствора после выщелачивания. Как известно, при подкислении растворов силикатов тотчас выделяется в свободном состоянии кремневая кислота, которая в зависимости от условий образует практически нерастворимые высокомолекулярные агрегаты и может оставаться в растворе в коллоидном состоянии. Далее такие растворы превращаются в студень, что является серьезным препятствием для их переработки. Растворы от выщелачивания КШ после термообработки их в смеси с карбонатом натрия остаются прозрачными и не загустевают. Возможно, это объясняется тем, что в присутствии свободного карбоната натрия в

продуктах обжига при их выщелачивании вначале образуются растворимые силикаты натрия, что и предотвращает образование силикагеля.

На Рис. 3 показано сравнение выщелачивания таких же материалов (исходного КШ и после обжига смеси  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}=1$ ) в зависимости от кислотности раствора. Не все РЗЭ показаны на рисунках для удобства чтения. Представлены данные по извлечению Sc, также La и Ge (легкие лантаноиды), т. к. их концентрации относительно высокие, а также Dy, поскольку его концентрация самая высокая

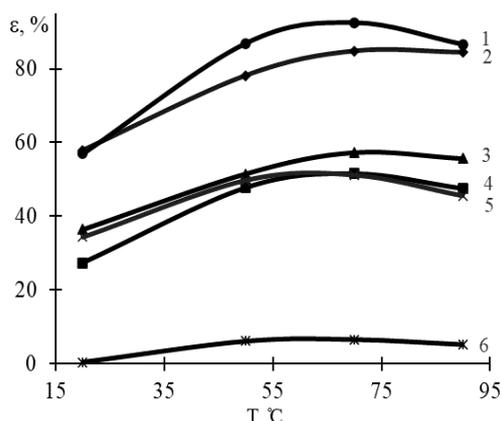


Рис. 5. Влияние температуры выщелачивания продуктов обжига ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}=1$ ) на извлечение в раствор

Fig. 5. Influence of the leaching temperature of the firing products ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{RS}=1$ ) on the extraction into solution:

1 – Dy, 2 – Sc, 3 – Al, 4 – La, 5 – Ce, 6 – Fe

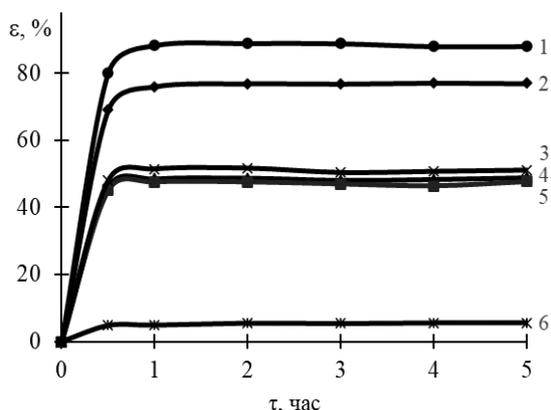


Рис. 6. Влияние продолжительности выщелачивания продуктов обжига на извлечение в раствор: ( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}=1$ ,  $t=90^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}=2$ )

Fig. 6. The effect of the duration of leaching of firing products on extraction into solution:

( $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{RS}=1$ ,  $t=90^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}=2$ )

1 – Dy, 2 – Sc, 3 – Ce, 4 – Al, 5 – La, 6 – Fe

среди тяжелых РЗЭ.

На всей линейке рН показатели извлечения основного элемента (алюминия) из продуктов обжига ниже по сравнению с выщелачиванием исходного КШ, а извлечение РЗЭ – выше, при этом для La и Ce – на 15-20% (при  $\text{pH}=1$ ), а для Sc и Dy – на 5-4%. При высоких рН (4-5) извлечение представленных на рисунке РЗЭ довольно низкое, оно постепенно повышается с уменьшением рН до 3 и достигает максимума при значениях рН около 1. Растворение алюминия протекает аналогично. Извлечение алюминия постепенно увеличивается в интервале  $\text{pH}=3-1$  и достигает 50-55%. Железо указано на графике для иллюстрации селективности выщелачивания. Растворение железа очень низкое. Извлечение железа в раствор составляет всего 2-4%. Однако концентрация его в растворе высока по сравнению с РЗЭ из-за его значительного содержания в КШ. В дальнейших экспериментах рекомендуется поддерживать  $\text{pH}=2$ . При этом достигаются приемлемые концентрации РЗЭ и основных металлов, которые мало меняются при повышении кислотности раствора.

Результаты изучения влияния массового соотношения  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}$  при обжиге на выщелачивание РЗЭ серной кислотой при  $\text{pH}=2$ , температуре  $90^\circ\text{C}$  в течение 1 часа показаны на Рис. 4. Извлечение РЗЭ увеличивается с ростом количества карбоната натрия в смеси с КШ от 25 до 100% от веса КШ: La и Ce – на 5-15%, а Sc и Dy – на 10%. Выщелачивание основных составляющих КШ (алюминия и железа) практически одинаково во всех опытах, показатели их извлечения составляют соответственно около 50 и 2-4%. По-видимому, оптимальное соотношение  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}$  при обжиге составляет 1:1, а показатели извлечения РЗЭ и основных элементов в большей степени определяются температурой выщелачивания.

Влияние температуры выщелачивания изучали при  $\text{pH}=2$  в течение 1 часа, отношение при обжиге  $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{КШ}=1$  (Рис. 5). Полученные данные не выявили существенного ухудшения выщелачивания при снижении температуры от  $90$  до  $50^\circ\text{C}$ . При дальнейшем понижении температуры до комнатной извлечение РЗЭ изменяется: для Sc и Dy с  $90$  до  $60\%$ , а La и Ce – с  $45$  до  $35\%$ . При этом отмечено существенное снижение растворимости алюминия (до  $35\%$ ) и железа, которое практически не переходит в раствор. Можно отметить и значительное ослабление условий выщелачивания. Поэтому в определенных случаях можно рекомендовать выщелачивание продукта обжига смеси КШ с карбонатом натрия (1:1) без нагрева.

Эксперименты по выщелачиванию продукта обжига КШ с карбонатом натрия (отношение 1:1) различной продолжительности (0,5-5 час)

проводили при температуре 90 °С, pH=2 (Рис. 6). Можно отметить, что извлечение РЗЭ в раствор заметно увеличивается в первые 0,5 часа опыта, к 1 часу достигает максимума и остается практически неизменным. Эффект высокой скорости растворения в начале опыта более выражен для Sc и Dy. Через 0,5 часа выщелачивания их извлечение в раствор составляет соответственно 69 и 80% с увеличением до максимальных 77 и 89%. Извлечение алюминия при этом достигает 49%, а железа – 4-5%.

Процент извлечения различен для разных РЗЭ. Это связано, как уже отмечено выше, с ассоциацией РЗЭ с разными материалами и их ионными радиусами [30]. Отмечено высокое извлечение диспрозия (представителя тяжелых РЗЭ). За ним следуют скандий, лантан и церий. Этот порядок выщелачивания немного меняется в зависимости от условий выщелачивания, но он сохраняется в разных сериях наших исследований и соответствует результатам, приведенным в литературе [24] для аналогичного материала.

Таким образом, предварительный обжиг КШ с добавкой карбоната натрия положительно влияет на извлечение РЗЭ. Наибольшее влияние на выщелачивание продукта обжига серной кислотой оказывают кислотность раствора (pH=2-1) и температура выщелачивания.

#### Выводы

Образец красного шлама (ОАО УАЗ-СУАЛ) содержит преобладающее количество (более 50%) железосодержащих фаз – гематита и гетита. Наряду с ними присутствуют катоит и шамозит, канкринит и кальцит, силикаты и алюмосиликаты магния, кварц, а также такие ценные металлы, как скандий, титан, галлий, редкоземельные элементы. Общее содержание РЗЭ – около 0,1%.

Предложена двухстадийная схема, включающая обжиг КШ с карбонатом натрия при температуре 500 °С и последующее выщелачивание продукта обжига серной кислотой. По данным РФА в продукте обжига КШ с Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> идентифицированы основные фазы – гематит и кальцит, в небольших количествах алюмосиликат и алюминат кальция, кварц, феррит и натриевый силикат титана, а также неизрасходованный карбонат натрия.

Выщелачивание продукта обжига смеси КШ с Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> показало некоторые преимущества по сравнению с выщелачиванием исходного КШ. В зависимости от расхода Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> при обжиге от pH раствора, продолжительности и температуры обработки выявлены оптимальные условия выщелачивания. Показано, что в интервале pH = 1-5 извлечение представленных РЗЭ (Dy, Sc, La, Ce) постепенно повышается с уменьшением pH и достигает максимума при pH = 1-2. Большое

значение на выщелачивание КШ оказывает температура. Выщелачивание серной кислотой продукта обжига (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/КШ =1) при pH = 1-2, t=90 °С в течение 1 час позволяет достичь высокое извлечение РЗЭ: Sc и Dy – 90% и выше, La и Ce – 45%. При этом в раствор переходит до 50-55% алюминия, 2-4% железа. Отметим, что при достаточно высоких показателях извлечения РЗЭ в раствор при температуре 20°С наблюдается существенное снижение растворимости алюминия (до 35%) и железа, которое практически не переходит в раствор.

*Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «УРАЛ-М».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тетенькин Д. Д. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. М. : ВИМС, 2002.
2. Donaldson D., Raahauge B.E. Essential Readings in Light Metals: Alumina and Bauxite // The Minerals, Metals & Materials Society. 2013. Vol. 1. DOI: 10.1002/9781118647868.ch116.
3. Power G., Gräfe M., Klauber C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. Pp. 33-45. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.02.006.
4. Verma A. S., Suri N. M., Kant S. Applications of bauxite residue: A mini-review // Waste. Manag. Res. 2017. Vol. 35. P. 999-1012. DOI: 10.1177/0734242X17720290.
5. Samal S., Ray A. K., Bandyopadhyay A. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India. A review // Int. J. Miner. Process. 2013. Vol. 118. Pp. 43-55. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.11.001.
6. Зиновеев Д. В. [и др.] Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 11. С. 843-858. DOI: 17073/0368-0797-2018-11-843-858.
7. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Recovery of iron from bauxite residue using advanced separation techniques // Miner. Eng. 2019. Vol. 134. Pp. 222-231. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.018.
8. Rai S., Nimje M.T., Chaddha M.J., Modak S., Rao K.R., Agnihotri A. Recovery of iron from bauxite residue using advanced separation techniques // Miner. Eng. 2019. Vol. 134. Pp. 222-231. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.018.
9. Wang Y., Zhang T., Lyu G., Guo F., Zhang W., Zhang Y. Recovery of alkali and alumina from bauxite residue (red mud) and complete reuse of the treated residue // J. Clean. Prod. 2018. Vol. 188. Pp. 456-465. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.009.
10. Johnston M., Clark M.W., McMahon P., Ward N. Alkalinity conversion of bauxite refinery

residues by neutralization // *J. Hazard. Mater.* 2010. Vol. 182. Pp. 710-715. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.091.

11. Al-Dhamri H., Melghit K. Use of alumina spent catalyst and RFCC wastes from petroleum refinery to substitute bauxite in the preparation of Portland clinker // *J. Hazard. Mater.* 2010. Vol. 179. Pp. 852-859. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.03.083.

12. Li C., Yu Jian, Li W., He Y., Gao S. Immobilization, enrichment and recycling of Cr(VI) from wastewater using a red mud/carbon material to produce the valuable chromite (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) // *Chem. Eng. J.* 2018. Vol. 350. Pp. 1103-1113. DOI: 10.1016/j.cej.2018.06.072.

13. Li Y., Wei G., Shao L., Li Z., Zhang L. Green synthesis of red mud based ZnO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite used for photo-Fenton reaction under visible light // *J. Clean. Prod.* 2019. Vol. 207. Pp. 717-727. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.051.

14. Feng Y., Wu D., Liao C., Deng Y., Zhang T., Shiha K. Red mud powders as low-cost and efficient catalysts for persulfate activation: Pathways and reusability of mineralizing sulfadiazine // *Sep. Purif. Technol.* 2016. Vol. 167. Pp. 136-145. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.04.051.

15. Binnemans K., Jones P. Tom, Blanpain B., Van Gerven T., Pontikes Y. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review // *J. Clean. Prod.* 2015. Vol. 99. Pp. 17-38. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.089.

16. Ujaczki É., Feigl V., Molnár M., Cusack P., Curtin T., Courtney R., O'Donoghue L., Davris P., Hugi C., Evangelou M., Balomenos E., Lenz M. Reusing bauxite residues: benefits beyond (critical raw) material recovery // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2018. Vol. 93. Pp 2498-2510. DOI: 10.1002/jctb.5687.

17. Маунг М. А. Извлечение скандия из красных шламов алюминиевого производства: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2019. 152 с.

18. Пягай И. Н. [и др.] Переработка отвального шлама глиноземного производства с извлечением скандиевого концентрата // *Записки горного института.* 2016. Т. 218. С. 225-232.

19. Рычков В. Н. [и др.] Патент № 2635206 С1 Российская Федерация, МПК С22В 59/00, С01F 17/00, С22В 3/24. Способ извлечения редкоземельных элементов из технологических и продуктивных растворов: № 2016146688: заявл. 28.11.2016; опубл. 09.11.2017 / заявитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

20. Копылова В. Д., Вальдман А. И., Бойко Э. Т. [и др.] Исследование сорбции ионов 3d-металлов

фосфорсодержащими ионитами // *Журнал Физической Химии.* 1984. Т. 58. № 1. С. 167-171.

21. Костикова Г. В., Мальцева И. Е., Краснова О. Г. и др. Использование тетраоктилдигликолямида для экстракционного концентрирования Sc из растворов кислотного выщелачивания красных шламов // *Химическая технология.* 2021. Т. 22. № 7. С. 299-306. DOI: 10.1134/S0040579522050086.

22. Reid S., Tam J., Yang M., Azimi G. Technospheric Mining of Rare Earth Elements from Bauxite Residue (Red Mud): Process Optimization, Kinetic Investigation, and Microwave Pretreatment // *Scientific Reports.* 2017. Vol. 7(1). P. 15252. DOI: 10.1038/s41598-017-15457-8.

23. Anawati J., Azimi G. Recovery of scandium from Canadian bauxite residue utilizing acid baking followed by water leaching // *Waste Manag.* 2019. Vol. 95. Pp. 549-559. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.044.

24. Borra C. R., Pontikes Y., Binnemans K., Van Gerven T. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud) // *Miner. Eng.* 2015. Vol. 76. Pp. 20-27. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.01.005.

25. Rivera R. M., Ulenaers B., Ounoughene G., Binnemans K., Van Gerven T. Extraction of rare earths from bauxite residue (red mud) by dry digestion followed by water leaching // *Miner. Eng.* 2018. Vol. 119. Pp. 82-92. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.01.023.

26. Аунг Х. Й., Бояринцев А. В., Степанов С. И. Выщелачивание РЗЭ из красных шламов в карбонатные и хлоридно-карбонатные растворы в условиях карбонизации // *Успехи в химии и химической технологии.* 2019. Т. 33. № 9 (219). С. 25-27.

27. Степанов С. И., Аунг М. М., Аунг Х. Й., Бояринцев А. В. Химические аспекты карбонатного выщелачивания скандия из красных шламов // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий.* 2018. Т. 80, № 4(78). С. 349-355. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-4-349-355.

28. Powder Diffraction File (PDF), produced by the International Centre for Diffraction Data, Newtown Square, PA. 2018.

29. Бушуева Н. П., Панова О. А. Исследование структуры и морфологических превращений слоистых алюмосиликатов при термическом воздействии // *Вестник БГТУ. Химическая технология.* – 2016. №6. С. 183. URL: <http://dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/1289> (дата обращения: 18.06.2025)

30. Yang Qu, Lian B. Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using *Penicillium tricolor* RM-10 // *Bioresource Technology.* 2013. Vol. 136. P. 16-23. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.03.070.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Об авторах:*

**Карапузикова Александра Александровна** (Екатеринбург, Россия) – аспирант, инженер 2 категории, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолына Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена 101; e-mail: Karapuzikovaalex-andra@mail.ru

**Галкова Людмила Ивановна** (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолына Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена 101; e-mail: galkowa@mail.ru

**Крылов Алексей Андреевич** (Екатеринбург, Россия) – кандидат химических наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолына Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена 101; e-mail: a020294@mail.ru

**Гуляева Роза Иосифовна** (Екатеринбург, Россия) – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолына Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена 101; e-mail: gulro-za@mail.ru

**Рычков Владимир Николаевич** (Екатеринбург, Россия) – доктор химических наук, профессор кафедры редких металлов и наноматериалов, Уральский Федеральный университет, физико-технологический институт, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира 21; e-mail: v.n.rychkov@urfu.ru

**Кириллов Евгений Владимирович** (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры редких металлов и наноматериалов, Уральский Федеральный университет, физико-технологический институт, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира 21; e-mail: e.kirillov.umn@gmail.com

**Боталов Максим Сергеевич** (Екатеринбург, Россия) – ассистент кафедры редких металлов и наноматериалов, Уральский Федеральный университет, физико-технологический институт, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира 21; e-mail: ms.botalov@urfu.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Карапузикова Александра Александровна – обзор соответствующей литературы, выполнение эксперимента, сбор и анализ данных, выводы, написание текста, оформление работы.

Галкова Людмила Ивановна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Крылов Алексей Андреевич – выполнение эксперимента, сбор и анализ данных, оформление работы.

Гуляева Роза Иосифовна – выполнение эксперимента, сбор и анализ данных, оформление работы.

Рычков Владимир Николаевич – постановка исследовательской задачи.

Кириллов Евгений Владимирович – сбор и анализ данных, оформление работы.

Боталов Максим Сергеевич – выполнение эксперимента, сбор и анализ данных, оформление работы.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### EXTRACTION OF RARE EARTH ELEMENTS FROM RED SLUDGE

Aleksandra A. Karapuzikova<sup>1</sup>, Lyudmila I. Galkova<sup>1</sup>, Alexey A. Krylov<sup>1</sup>, Rosa I. Gulyaeva<sup>1</sup>, Vladimir N. Rychkov<sup>2</sup>, Evgeniy V. Kirillov<sup>2</sup>, Maxim S. Botalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institution of Science Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin

\* for correspondence: Karapuzikovaalexandra@mail.ru



#### **Abstract.**

*Red sludge (RS) is a waste product formed in the production of alumina using the Bayer method. The scale of its formation is equivalent to the volume of marketable products, averaging 1.1 - 1.2 tons per 1 ton of alumina. Storage*

*Article info*

Received:  
10 July 2025

Accepted for publication:  
15 January 2026

Accepted:  
12 February 2026

Published:  
19 March 2026

**Keywords:** REE, red sludge, roasting, sodium carbonate, XFA, differential thermal analysis, leaching.

of RS is a spatial and environmental problem. Currently, RS is not recycled and used in small quantities. Red sludges contain essential valuable elements such as aluminum, iron, titanium, calcium, silicon, and free alkali. Rare-earth elements concentrated in the sludge are suitable for industrial extraction. This work is aimed at data extension regarding leaching of REE from RS using sulfuric acid. The proposed method of low-temperature RS roasting with sodium carbonate followed by leaching of the roasting product using sulfuric acid is of interest. The effect of sodium carbonate additives in the process of RS roasting as well as leaching parameters, such as pH solution, temperature, and duration, were studied. The composition of the initial RS sample and the products of its roasting with sodium carbonate were determined by X-ray phase analysis. The method of differential thermal analysis followed by X-ray diffraction of heat treatment products was used to determine the thermal transformations during heating of RS and its mixture with  $Na_2CO_3$ . It has been established that roasting with sodium carbonate has a positive effect on leaching. The total extraction of REE increased by 10-15%. In addition, leaching of the roasted mixture helps to prevent the formation of silica gel. The acidity and the temperature of the solution have the greatest effect. The extraction of Sc and Dy into the solution reaches 90%, and La and Ce – about 50%. It is noted that leaching without heating leads to a decrease in the solubility of aluminum (from 55 to 35%) and iron, which practically does not pass into solution.

**For citation:** Karapuzikova A.A., Galkova L.I., Krylov A.A., Gulyaeva R.I., Rychkov V.N., Kirillov E.V., Botalov M.S. Extraction of rare earth elements from red sludge. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 1(173):42-55. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-42-55, EDN: YKHQFD

#### REFERENCES

1. Tetenkin D.D. Gosudarstvennyj doklad o sostoyanii i ispol'zovanii mineral'nosyr'evykh resursov Rossijskoj Federacii v 2021 godu [State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021]. M: VIMS; 2002.
2. Donaldson D., Raahauge B.E. Essential Readings in Light Metals: Alumina and Bauxite The Minerals, Metals & Materials Society. 2013; 1. DOI: 10.1002/9781118647868.ch116.
3. Power G., Gräfe M., Klauber C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy*. 2011; 108:33-45. DOI: 10.1016/j.hydromet.2011.02.006.
4. Verma A.S., Suri N.M., Kant S. Applications of bauxite residue: A mini-review. *Waste. Manag. Res*. 2017; 35:999-1012. DOI: 10.1177/0734242X17720290.
5. Samal S., Ray A.K., Bandopadhyay A. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India. A review. *Int. J. Miner. Process*. 2013; 118:43-55. DOI: 10.1016/j.minpro.2012.11.001.
6. Zinoveev D.V. [et al.] [Review of the world practice of red sludge processing. Part 1. Pyrometallurgical methods] *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 2018; 61(11):843-858. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-843-858.
7. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Recovery of iron from bauxite residue using advanced separation techniques. *Miner. Eng*. 2019; 134:222-231. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.018.
8. Rai S., Nimje M.T., Chaddha M.J., Modak S., Rao K.R., Agnihotri A. Recovery of iron from bauxite

residue using advanced separation techniques. *Miner. Eng*. 2019; 134:222-231. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.02.018.

9. Wang Y., Zhang T., Lyu G., Guo F., Zhang W., Zhang Y. Recovery of alkali and alumina from bauxite residue (red mud) and complete reuse of the treated residue. *J. Clean. Prod*. 2018; 188:456-465. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.009.

10. Johnston M., Clark M.W., McMahon P., Ward N. Alkalinity conversion of bauxite refinery residues by neutralization. *J. Hazard. Mater*. 2010; 182:710-715. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.091.

11. Al-Dhamri H., Melghit K. Use of alumina spent catalyst and RFCC wastes from petroleum refinery to substitute bauxite in the preparation of Portland clinker. *J. Hazard. Mater*. 2010; 179:852-859. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.03.083.

12. Li C., Yu Jian, Li W., He Y., Gao S. Immobilization, enrichment and recycling of Cr(VI) from wastewater using a red mud/carbon material to produce the valuable chromite ( $FeCr_2O_4$ ). *Chem. Eng. J*. 2018; 350:1103-1113. DOI: 10.1016/j.cej.2018.06.072.

13. Li Y., Wei G., Shao L., Li Z., Zhang L. Green synthesis of red mud based  $ZnOFe_2O_3$  composite used for photo-Fenton reaction under visible light. *J. Clean. Prod*. 2019; 207:717-727. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.051.

14. Feng Y., Wu D., Liao C., Deng Y., Zhang T., Shiha K. Red mud powders as low-cost and efficient catalysts for persulfate activation: Pathways and reusability of mineralizing sulfadiazine. *Sep. Purif*.

Technol. 2016; 167:136-145. DOI: 10.1016/j.seppur.2016.04.051.

15. Binnemans K., Jones P. Tom, Blanpain B., Van Gerven T., Pontikes Y. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: a critical review. *J. Clean. Prod.* 2015; 99:17-38. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.089.

16. Ujaczki É., Feigl V., Molnár M., Cusack P., Curtin T., Courtney R., O'Donoghue L., Davris P., Hugi C., Evangelou M., Balomenos E., Lenz M. Re-using bauxite residues: benefits beyond (critical raw) material recovery. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2018; 93:249-2510. DOI: 10.1002/jctb.5687.

17. Maung M.A. Izvlechenie skandiya iz krasnyh shlamov aluminievogo proizvodstva: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Extraction of scandium from red sludges of aluminum production: dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. 2019. 152 P.

18. Pyagai I.N. [et al.] Pererabotka otval'nogo shlama glinozemnogo proizvodstva s izvlecheniem skandievogo koncentrata [Processing of waste sludge from alumina production with the extraction of scandium concentrate]. *Zapiski gornogo instituta.* 2016; 218:225-232.

19. Rychkov V.N. [et al.] Patent № 2635206 C1 Russian Federation, IPC C22B 59/00, C01F 17/00, C22B 3/24. Sposob izvlecheniya redkozemel'nyh elementov iz tekhnologicheskikh i produktivnyh rastvorov [Method of extracting rare-earth elements from process and productive solutions]: №. 2016146688: application 28.11.2016: publ. 09.11.2017. Applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin."

20. Kopylova V.D., Waldman A.I., Boyko E.T. [et al.] Issledovanie sorbcii ionov 3d metallov fosforsoderzhashchimi ionitami [Study of sorption of 3d metal ions by phosphorus-containing ionites]. *Zhurnal Fizicheskoy Himii.* 1984; 58(1):167-171.

21. Kostikova G.V., Maltseva I.E., Krasnova O.G. et al. Ispol'zovanie tetraoktildiglikol'amida dlya ekstrakcionnogo koncentrirovaniya Sc iz rastvorov kislotnogo vyshchelachivaniya krasnyh shlamov [The use of tetraoctyl diglycolamide for the extraction concentration of Sc from acid leaching solutions of red sludges]. *Himicheskaya tekhnologiya.* 2021; 22(7):299-306. DOI: 10.1134/S0040579522050086.

22. Reid S., Tam J., Yang M., Azimi G. Technospheric Mining of Rare Earth Elements from Bauxite Residue (Red Mud): Process Optimization, Kinetic Investigation, and Microwave Pretreatment. *Scientific Reports.* 2017; 7(1):15252. DOI: 10.1038/s41598-017-15457-8.

23. Anawati J., Azimi G. Recovery of scandium from Canadian bauxite residue utilizing acid baking followed by water leaching. *Waste Manag.* 2019; 95:549-559. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.044.

24. Borra C.R., Pontikes Y., Binnemans K., Van Gerven T. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). *Miner. Eng.* 2015; 76:20-27. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.01.005.

25. Rivera R.M., Ulenaers B., Ounoughene G., Binnemans K., Van Gerven T. Extraction of rare earths from bauxite residue (red mud) by dry digestion followed by water leaching. *Miner. Eng.* 2018; 119:82-92. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.01.023.

26. Aung Kh. Y., Boyarintsev A.V., Stepanov S.I. Vyshchelachivanie RZE iz krasnyh shlamov v karbonatnye i hloridno-karbonatnye rastvory v usloviyah karbonizatsii [Leaching of rare-earth elements from red sludges into carbonate and chloride-carbonate solutions under carbonization conditions]. *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii.* 2019; 33(9(219)):25-27.

27. Stepanov S.I., Aung M.M., Aung H.Y., Boyarintsev A.V. Himicheskie aspekty karbonatnogo vyshchelachivaniya skandiya iz krasnyh shlamov [Chemical aspects of carbonate leaching of scandium from red sludge]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tekhnologij.* 2018;

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

**Aleksandra A. Karapuzikova** (Ekaterinburg, Russia) – Engineer of 2 category, Postgraduate student of the Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, 101 Amundsen St.; e-mail: Karapuzikovaalexandra@mail.ru

**Lyudmila I. Galkova** (Ekaterinburg, Russia) – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, 101 Amundsen St.; e-mail: galkowa@mail.ru

**Alexey A. Krylov** (Ekaterinburg, Russia) – Candidate of Chemical Sciences, Researcher of the Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, 101 Amundsen St.; e-mail: a020294@mail.ru

**Rosa I. Gulyaeva** (Ekaterinburg, Russia) – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher of the Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620016, Ekaterinburg, 101 Amundsen St.; e-mail: gulroza@mail.ru

**Vladimir N. Rychkov** (Ekaterinburg, Russia) – Doctor of Sciences in Chemistry, Professor of the Department of Rare Metals and Nanomaterials. Ural Federal University, Institute of Physics and Technology, 620062, Ekaterinburg, 21 Mira St.; e-mail: v.n.rychkov@urfu.ru

**Evgeniy V. Kirillov** (Ekaterinburg, Russia) – Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Rare Metals and Nanomaterials. Ural Federal University, Institute of Physics and Technology, 620062, Ekaterinburg, 21 Mira St.; e-mail: e.kirillov.umn@gmail.com

**Maxim S. Botalov** (Ekaterinburg, Russia) – Assistant of the Department of Rare Metals and Nanomaterials. Ural Federal University, Institute of Physics and Technology, 620062, Ekaterinburg, 21 Mira St.; e-mail: ms.botalov@urfu.ru

*Contribution of the authors:*

Aleksandra A. Karapuzikova – review of relevant literature, performing experiments, collecting and analyzing data, drawing conclusions, writing text, design;

Lyudmila I. Galkova – review of relevant literature, collecting and analyzing data, drawing conclusions, writing text;

Alexey A. Krylov – performing experiments, collecting and analyzing data, paper design;

Rosa I. Gulyaeva – performing experiments, collecting and analyzing data, paper design;

Vladimir N. Rychkov – research problem statement;

Evgeniy V. Kirillov – collecting and analyzing data, paper design;

Maxim S. Botalov – performing experiments, collecting and analyzing data, paper design.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

