

СТРАТЕГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАУКОЕМКИХ ПРОДУКТОВ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**А.В. Афинеевский, Д.А. Прозоров, Д.В. Смирнов, Н.Е. Гордина**

Дмитрий Алексеевич Прозоров (ORCID 0000-0002-1749-2828)*, Андрей Владимирович Афинеевский (ORCID 0000-0001-6933-5130), Дмитрий Владимирович Смирнов (ORCID 0000-0002-5550-3866)

НИИ Синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: prozorovda@mail.ru*, afineevskiy@mail.ru, morgandvs37@gmail.com

Наталья Евгеньевна Гордина (ORCID 0000-0002-1067-4688)

Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: gordinane@mail.ru

В статье приведен обзор результатов исследований красного шлама как отхода процессов переработки бокситов в алюминий. Проведен анализ распространенности красного шлама в мире, особенностей его хранения и утилизации, а также возможности его переработки в необходимые для производства различных материалов продукты и полупродукты. Приводятся особенности химического состава красного шлама в зависимости от места добычи и переработки исходного сырья. Представлен анализ мировой практики по реализации возможности переработки красного шлама различными методиками. Анализ литературных данных показал, что существует большое количество научных групп, занимающихся проблемами переработки красного шлама. Основными полезными продуктами переработки красного шлама являются оксиды различных металлов, редкоземельные и радиоактивные металлы. Продукты переработки красного шлама могут быть использованы в строительстве, очистке сточных вод, сельском хозяйстве и т.д. В статье одним из наиболее значимых разделов является защита окружающей среды от вредного воздействия красного шлама. Представлены наработки мировых ученых по минимизации такого воздействия и рассмотрены меры, которые необходимо принять в дальнейшем для защиты окружающей среды. Данная обзорная статья позволит систематизировать имеющиеся научные разработки по переработке красного шлама и может быть использована как основа для дальнейшего изучения возможности получения промышленно важных продуктов из отходов металлургической промышленности.

Ключевые слова: красный шлам, переработка экология, катализ, оксиды металлов

Для цитирования:

Афинеевский А.В., Прозоров Д.А., Смирнов Д.В., Гордина Н.Е. Стратегии использования железосодержащих отходов при получении наукоемких продуктов химической промышленности. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 11. С. 6–14. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7111.

For citation:

Afineevskii A.V., Prozorov D.A., Smirnov D.V., Gordina N.E. Strategies for the use of iron-containing waste in the production of high-tech chemical industry products. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 11. P. 6–14. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711. 7111.

STRATEGIES FOR THE USE OF IRON-CONTAINING WASTE IN THE PRODUCTION OF HIGH-TECH CHEMICAL INDUSTRY PRODUCTS

A.V. Afineevskii, D.A. Prozorov, D.V. Smirnov, N.E. Gordina

Dmitrii A. Prozorov (ORCID 0000-0002-1749-2828)*, Andrei V. Afineevskii (ORCID 0000-0001-6933-5130), Dmitrii V. Smirnov (ORCID 0000-0002-5550-3866)

Research laboratory Synthesis, Research and Testing of Catalytic and Adsorption Systems for the Processing of Hydrocarbon Row materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: prozorovda@mail.ru*, afineevskiy@mail.ru, morgandvs37@gmail.com

Natalia E. Gordina (ORCID 0000-0002-1067-4688)

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: gordinane@mail.ru

The article provides an overview of various data on red mud as a waste from the processing of bauxite into aluminum. An analysis was made of the prevalence of red mud in the world, the features of its storage and disposal, as well as the possibility of its processing into products and intermediates necessary for the production of various materials. The features of the chemical composition of red mud are given depending on its place of production and storage. An analysis of world practice on the implementation of the possibility of processing red mud using various techniques is presented. Analysis of literature data has shown that there are a large number of scientific groups involved in the processing of red mud into products such as oxides of various metals, the extraction of rare earth and radioactive metals from it, as well as the production of other products that can be used in construction, wastewater treatment, and agriculture etc. In the article, one of the most significant sections is the protection of the environment from the harmful effects of red mud. The achievements of world scientists to minimize such impacts are presented and measures that need to be taken in the future to protect the environment are considered. In addition, one of the important sections of this article is the section devoted to the processing of red mud into catalysts for various reactions, consisting in most cases of transition metals supported on aluminum oxide. This review article will allow us to systematize existing scientific developments on the processing of red mud and can be used as a basis for further study of the possibility of obtaining industrially important products from metallurgical industry waste.

Keywords: red mud, environmental recycling, catalysis, metal oxides

ВВЕДЕНИЕ

Красный шлам – это отход, образующийся при производстве алюминия в процессе Байера, основном методе извлечения алюминия из бокситовой руды [1]. В среднем, на каждую тонну произведенного алюминия образуется 1-2 т красного шлама (табл. 1), что делает его одним из крупнейших промышленных отходов [2, 3]. При этом утилизируется менее 4% от общего объема [3]. Красный шлам характеризуется высокой щелочностью и сложным химическим составом, включающим оксиды железа, алюминия, титана и кремния, а также другие микроэлементы и соединения [4].

Несмотря на его статус отхода, красный шлам обладает свойствами, которые потенциально могут быть полезны для повторного использования в различных отраслях [1-3, 5]. Однако проблемы с утилизацией и хранением остаются серьезной экологической проблемой для предприятий алюминиевой промышленности и органов природоохранного контроля [6]. Традиционные методы утилизации, такие как хранение в искусственных водоемах, сопряжены с риском выщелачивания токсичных компонентов в окружающую среду [7]. Кроме того, глобальные масштабы производства красного шлама требуют поиска устойчивых решений для его переработки.

Таблица 1

Годовое производство красного шлама для первых десяти стран [3,8]
Table 1. Annual production of red mud for the top ten countries [3,8]

Страна	Годовое производство алюминия (2023 г), 10 ⁶ т	Годовое производство красного шлама (1 г), 10 ⁶ т
Китай	82	105 (2018)
Австралия	19	28 (2019)
Бразилия	10	10,6 (2017)
Индия	7,3	10,0 (2018)
Россия	2,4	3,78 (2019)
ОАЭ	2,3	3,29 (2021)
Саудовская Аравия	1,8	2,52 (2019)
Канада	1,6	2,10 (2019)
Ямайка	1,5	2,94 (2019)
Вьетнам	1,4	2,0 (2021)

Таблица 2

Состав красного шлама на различных предприятиях мира [13,14]
Table 2. Composition of red mud at various enterprises around the world [13,14]

Страна	Предприятие	Основные компоненты, % _{масс.}					
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Na ₂ O	CaO
Австралия	AWAAK	28,5	24,0	3,11	18,8	3,4	5,26
Бразилия	Alunorte	45,6	15,1	4,29	15,6	7,5	1,16
Великобритания	ALCAN	46,0	20,0	6,0	5,0	8,0	1,0
Венгрия		38,45	15,2	4,6	10,15	8,12	
Индия	Все	20,26	19,60	28,00	6,74	8,09	
	MALCO	45,17	27	5,12	5,7	3,64	
	HINDALCO	35,46	23	17,2	5	4,85	
	BALCO	33,8	15,58	22,5	6,84	5,2	
	NALCO*	52,39	14,73	3,3	8,44	4,00	
Испания	Alcoa	37,5	21,2	11,45	4,4	3,6	5,51
Италия	Eurallumina	35,2	20	9,2	11,6	7,5	6,7
Канада	ALCAN	31,6	20,61	6,23	8,89	10,26	1,66
Россия	БАЗ СУАЛ	43,1	14,1	4,1	9,6	4,4	15,5
Суринам		24,81	19	12,15	11,9	9,29	
США	ALCOA Mobile	30,4	16,2	10,11	11,14	2	
	Arkansas	55,6	12,15	4,5	4,5	1,5-5,0	
	Sherwon	50,54	11,13	Следы	2,56	9	
	RMC	35,5	18,4	6,31	8,5	6,1	7,73
Тайвань		41,3	20,21	2,9	17,93	3,8	
Турция	Seydisehir	36,94	20,39	4,98	15,74	10,10	2,23
Франция	Aluminum Pechiney	26,62	15,0	15,76	4,98	1,02	22,21
ФРГ	Baudart	38,75	20	5,5	13	8,16	
	AOSG	44,8	16,2	12,33	5,4	4,0	5,22
Ямайка		50,9	14,2	6,87	3,4	3,18	

Цель данного обзора – провести всесторонний анализ различий в составе красного шлама в зависимости от места его происхождения, подчеркнуть актуальность решения проблем, связанных с его утилизацией и переработкой, рассмотреть различные стратегии использования красного шлама и оценить их экологические последствия, обсудить перспективы повышения ценности этого промышленного побочного продукта.

Реализация этих задач позволит расширить существующие знания о красном шламе и предложить пути его преобразования в ценный ресурс. Эти усилия имеют ключевое значение для продвижения к более устойчивой и замкнутой экономике, где промышленные отходы становятся источником инноваций и способствуют более эффективному использованию ресурсов.

ОБРАЗОВАНИЕ И СОСТАВ КРАСНОГО ШЛАМА

Красный шлак повсеместный побочный продукт процесса Байера, образуется во время добычи глинозема из бокситовой руды, что является ключевым этапом производства алюминия [9]. В ходе процесса бокситовая руда разлагается в растворе гидроксида натрия при высоких температурах [10]. Твердый остаток, который остается после разложения, отделяется от богатой глиноземом жидкости с помощью седиментации, фильтрации или центрифугирования. В результате образуется раствор алюмината натрия, из которого оксид алюминия осаждается путем добавления затравочных кристаллов, с последующим охлаждением.

Химический состав красного шлама варьируется в зависимости от источника бокситовой руды, условий процесса Байера и дополнительных этапов обработки. Обычно он содержит оксиды железа (Fe_2O_3), алюминия (Al_2O_3), кремния (SiO_2), титана (TiO_2), а также небольшие количества кальция, натрия, магния и других элементов [11] (табл. 2). Также в составе могут присутствовать микроэлементы, такие как скандий [12], и примеси, связанные с исходной рудой или добавками в процессе Байера.

Шлам обычно имеет высокую щелочность (рН 10-13 и выше) [15], которая может влиять на растворимость и подвижность его компонентов, что создает сложности при хранении и утилизации, а также негативно воздействует на окружающую среду и снижает возможности применения. Кроме того, красный шлак характеризуется мелкодисперсным составом, при котором значительная часть частиц имеет диаметр менее 10 мкм [16-21]. Мелкозернистая структура придает шламу когезионные и коллоидные свойства, влияющие на его поведение в экологических и промышленных условиях.

Таким образом, на характеристики красного шлама влияют следующие факторы: состав и минералогия исходной бокситовой руды, различия в технологических параметрах процесса извлечения глинозема, эффективность методов разделения твердой и жидкой фаз на глиноземных заводах, условия хранения и утилизации шлама.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАСНОГО ШЛАМА

Традиционные методы утилизации красного шлама, такие как хранение в искусственных водоемах, вызывают опасения по поводу потенциальных экологических рисков и долгосрочного влияния на экосистемы и здоровье человека [22]. Такое хранение сопровождается рядом проблем:

ограниченность площадей, риск разрушения плотин и вероятность выщелачивания токсичных компонентов в окружающую почву и водоемы. Долговременная стабильность этих хранилищ может нарушаться из-за эрозии, сейсмической активности и изменения климата, что повышает риск выброса шлама и загрязнителей в окружающую среду.

Утилизация красного шлама сопряжена с экологическими рисками, включая загрязнение подземных и поверхностных вод и нарушение экосистем. Его щелочная природа может повышать уровень рН в почве и воде, что приводит к изменению доступности питательных веществ, подвижности микроэлементов и активности микроорганизмов [23]. Также шлак может содержать опасные элементы, такие как тяжелые металлы (например, хром, ванадий) и радиоактивные изотопы (например, торий, уран), представляющие угрозу для здоровья человека и экосистем через биоаккумуляцию и биомагнификацию в пищевых цепях [24].

Для решения экологических проблем, связанных с красным шламом, могут быть применены следующие меры:

1. Инженерные и управленческие решения для снижения риска разрушения хранилищ и выбросов шлама;
2. Программы мониторинга для оценки влияния переработки шлама на окружающую среду, включая качество грунтовых и поверхностных вод;
3. Технологии восстановления для устранения загрязненных участков и смягчения текущих рисков;
4. Правовое регулирование для обеспечения соблюдения экологических стандартов и продвижения устойчивых методов обращения с шламом.

Комплексный подход к управлению красным шламом с междисциплинарным сотрудничеством и инновациями позволит минимизировать его воздействие на окружающую среду, защитить здоровье людей и способствовать устойчивому использованию этого промышленного отхода. Алюминиевая промышленность может внести значительный вклад в переход к более экологически чистому и ресурсосберегающему будущему.

СТРАТЕГИИ ПЕРЕРАБОТКИ КРАСНОГО ШЛАМА

Красный шлак привлекает все большее внимание как потенциальный ресурс для промышленных, экологических и сельскохозяйственных применений [3-5, 6, 9, 11, 25]. Стратегии его использования исследуются в различных секторах: от строительных материалов до очистки сточных вод и восстановления ресурсов.

Использование в строительных материалах

Одним из перспективных направлений является включение красного шлама в строительные материалы, такие как кирпич, бетон и асфальт (включая использование в качестве пигмента) [26, 27]. Красный шлам может частично заменить традиционные материалы – глину, песок и цемент, что снижает воздействие строительной отрасли на окружающую среду и улучшает ресурсную эффективность. Исследования [28, 29] показали, что использование красного шлама в производстве кирпича улучшает механическую прочность, теплоизоляционные свойства и долговечность конечного продукта. Аналогично, шлам исследовался как добавка в бетон, повышающая его удобоукладываемость, стойкость к сульфатному воздействию и щелочно-кремнеземной реакции, и снижающая проницаемость [30, 31].

Применение в очистке сточных вод

Красный шлам перспективен для очистки сточных вод, благодаря своей высокой удельной поверхности и реакционной способности. Он используется как адсорбент для удаления тяжелых металлов, органических загрязнений и избыточных микроэлементов из водных растворов [16, 32, 33]. Кроме того, красный шлам применяют в качестве коагулянта или флокулянта для удаления взвешенных частиц и снижения мутности воды [34]. Его

широкая доступность и низкая стоимость делают его привлекательным решением для улучшения качества воды.

Добавка в почву для восстановления сельскохозяйственных угодий и экосистем

Красный шлам исследовался как добавка в почву для повышения ее плодородия, структуры и способности удерживать влагу [11, 35-37]. За счет щелочного характера и богатого минерального состава он может нейтрализовать кислые почвы, улучшать доступность питательных веществ и стимулировать рост растений. Также шлам способен иммобилизовать токсичные вещества в загрязненных почвах, уменьшая их подвижность и биодоступность [32, 38].

Извлечение ресурсов

Красный шлам содержит ценные ресурсы, включая алюминий, железо, титан и редкоземельные элементы, которые могут быть извлечены и переработаны [3, 9, 34, 39, 40]. Их добыча снижает потребность в первичных ресурсах и уменьшает экологический ущерб, связанный с традиционной добычей. Извлечение металлов также может повысить экономическую целесообразность проектов по переработке красного шлама, способствуя инвестициям в новые технологии.

На рисунке показана классификация методов извлечения металлов [41].

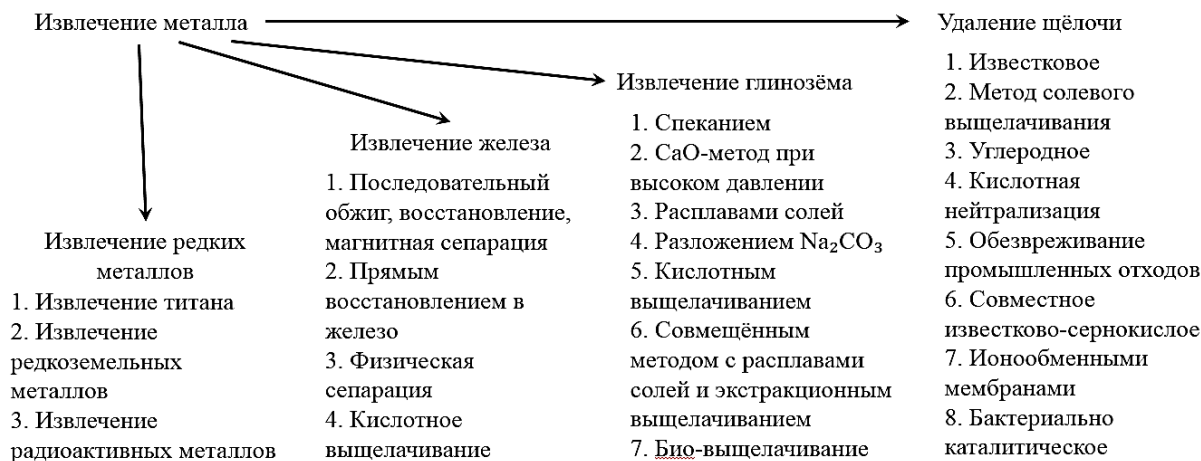


Рис. Классификация основных методов извлечения металлов [34]
 Fig. Classification of the main methods of metal extraction [34]

Использование красного шлама для создания катализаторов

Большая удельная поверхность, присутствие оксидов переходных металлов и щелочная природа делают красный шлам перспективным материалом для создания катализаторов различных реакций.

Существует множество подходов к преобразованию красного шлама в каталитически активные материалы [34, 42, 43]. Эти методы обычно включают предварительную обработку для модификации химического состава и структуры поверхности. В частности, применяют кислотное выщелачивание для удаления нежелательных компонен-

тов, термическую активацию для увеличения площади поверхности и реакционной способности, а также пропитку или осаждение активных частиц для усиления специфических каталитических функций. Оптимизируя условия синтеза, можно настраивать катализаторы из красного шлама для конкретных процессов, таких как гидрирование [38], окисление [35] и конверсия углеводородов [37]. Такие катализаторы продемонстрировали способность разлагать органические загрязнители, включая красители, фенолы и фармацевтические вещества, в процессах гетерогенного каталитического окисления [44]. Катализаторы на основе красного шлама также используются для очистки промышленных сточных вод и атмосферных выбросов.

В нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности катализаторы из красного шлама применяются в реакциях гидропереработки и крекинга для улучшения качества сырой нефти и нефтепродуктов [36, 45, 46]. Эти катализаторы активны в процессах удаления серы, восстановления оксидов азота и конверсии углеводородов, что способствует повышению эффективности и экологичности нефтеперерабатывающих процессов [47]. Также они исследуются для переработки биомассы и производства биотоплива, предлагая решения для энергоэффективного производства и снижения выбросов углекислого газа [48].

ЛИТЕРАТУРА

1. Баринкова А.А., Пириайнен В.Ю., Баринков В.М. Новый композиционный материал с нейтрализованным красным шламом. *Информ.-технол. вестн.* 2021. № 2. С. 156-169.
2. 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. *Изв. вузов. Черная металлургия.* 2018. Т. 61. № 11. С. 843-858. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-843-858.
3. Wang M., Liu X. Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. *J. of Hazard. Mater.* 2020. V. 408. P. 124420. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124420.
4. Анисимов Л.А., Донцова О.Л. Месторождения редкоземельных элементов – перспективный стратегический ресурс России. *Недра Поволжья и Прикаспия.* 2023. № 112. С. 11-20. DOI: 10.24412/1997-8316-2023-112-11-20.
5. Джафарова С.Т., Ахмедов М.М., Аббасова Н.И. К вопросу о повторном использовании отходов алюминиевой промышленности – красного шлама. Тез. докл. V Международной конференции-школы по химической технологии ХТ'16. Волгоград. 2016. С. 19-20.
6. Нисковская Е.В. Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов в строительстве. М.: Проспект. 2015. 312 с.
7. Водолазов Л.И., Молчанова Т.В., Маликов В.А. Новые способы и новая технология сернокислотного обезвреживания и переработки красных шламов-отходов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Красный шлам, ранее рассматривавшийся как отход, превратился в перспективный ресурс с множеством применений в различных отраслях. Его использование в строительных материалах, синтез адсорбентов и катализаторов, а также извлечение ценных элементов позволяют сократить образование отходов и улучшить ресурсную эффективность. Однако для полного раскрытия его потенциала необходимы дальнейшие исследования, включая разработку масштабируемых и экономически эффективных технологий, оценку экологических рисков и исследование новых возможностей и рынков.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2024-481.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science, agreement N 075-15-2024-481.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. Barinkova A.A., Piirainen V.Yu., Barinkov V.M. New composite material with neutralized red mud. *Inform.-Tekhnol. Vestn.* 2021. N 2. P. 156-169 (in Russian).
2. Zinoveev D.V., Grudinsky P.I., Dyubanov V.G., Kovalenko L.V., Leontyev L.I. Review of global practices in red mud processing. Part 1. Pyrometallurgical methods. *Izv. Vuzov. Chernaya Metallurgiya.* 2018. V. 61. N 11. P. 843-858 (in Russian). DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-843-858.
3. Wang M., Liu X. Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. *J. Hazard. Mater.* 2020. V. 408. P. 124420. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124420.
4. Anisimov L.A., Dontsova O.L. Deposits of rare earth elements are a promising strategic resource for Russia. *Nedra Povolzh'ya Prikaspiya.* 2023. N 112. P. 11-20 (in Russian). DOI: 10.24412/1997-8316-2023-112-11-20.
5. Jafarova S.T., Akhmedov M.M., Abbasova N.I. On the issue of reusing waste from the aluminum industry - red mud. Abstracts of reports of the V International Conference-School on Chemical Technology HT'16. Volgograd. 2016. P. 19-20 (in Russian).
6. Niskovskaya E.V. Environmental protection and rational use of natural resources in construction. М.: Prospekt. 2015. 312 p. (in Russian).
7. Vodolazov L.I., Molchanova T.V., Malikov V.A. New methods and new technology for sulfuric acid neutralization and processing of red mud-waste from alumina production into building materials and coagulants with the associated production of pure scandium salts, rare earths and aluminum

- производства глинозема в строительные материалы и коагулянты с попутным получением чистых солей скандия, редких земель и гидроокиси алюминия. *Горн. Информ.-аналит. бюлл. (науч.-техн. журн.)*. 1995. № 2. С. 99-102.
8. <https://www.statista.com/statistics/264963/global-alumina-production-by-country/> (online on 02.04.2024).
 9. **Юрков А.Л., Курошев И.С., Доброхотова М.С.** Производство алюминия. М.: Реноме. 2022. 120 с.
 10. **Логинава И.В., Кырчиков А.В., Пенюгалова Н.П.** Технология производства глинозема. Екатеринбург: -во Урал. Ун-та. 2015. 336 с.
 11. **Samal S.** Utilization of Red Mud as a Source for Metal Ions—A Review. *Materials*. 2021. V. 14. N 9. P. 2211. DOI: 10.3390/ma14092211.
 12. **Medvedev A.S., Kirov S.S., Khairullina R.T., Suss A.G.** Carbonation leaching of scandium from red mud using preliminary gasification of the pulp with carbon dioxide. *Non-ferrous Metals*. 2016. N 6. P. 67-73. DOI: 10.17580/tsm.2016.06.09.
 13. **Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N.** Trends in red mud utilization—a review. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 2004. V. 26. N 1. P. 1-29. DOI: 10.1080/08827500490477603.
 14. **Sutar H., Mishra S.C., Sahoo S., Chakraverty A.P., Maharana H.S.** Progress of red mud utilization: An overview. *Am. Chem. Sci. J.* 2014. V. 4. N 3. P. 255-279. DOI: 10.9734/ACSJ/2014/7258.
 15. **Patel S., Pal B.K.** Current status of an industrial waste: red mud an overview. *Ijltemas*. 2015. V. 4. N 8. P. 1-16.
 16. **Reddy P.S., Reddy N.G., Serjun V.Z., Mohanty B., Das S.K., Reddy K.R., Rao B.H.** Properties and assessment of applications of red mud (bauxite residue): current status and research needs. *Waste Biomass Valorization*. 2021. V. 12. P. 1185-1217. DOI: 10.1007/s12649-020-01089-z.
 17. **Rai S., Wasewar K.L., Mukhopadhyay J., Yoo C.K., Uslu H.** Neutralization and utilization of red mud for its better waste management. *Arch. Environ. Sci.* 2012. V. 6. P. 13–33.
 18. **Reddy N.G., Rao B.H., Reddy K.R.** Biopolymer amendment for mitigating dispersive characteristics of red mud waste. *Geotech. Lett.* 2018. V. 8. N 3. P. 201–207. DOI: 10.1680/jgele.18.00033.
 19. **Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N.** Trends in red mud utilization—a review. *Min. Process. Extr. Metall. Rev.* 2005. V. 26. N 1. P. 1–29. DOI: 10.1080/08827500490477603.
 20. **Kirichenko A.G., Nasekan Yu.P., Kolesnik N.F.** Influence of the granulometric composition of red mud on the kinetics of carburization. *Vestn. NTI «KHPI»*. 2011. N 33. P. 7-11 (in Russian).
 21. **Rakhimova O.V., Seredkina O.R., Lanovetskiy S.V.** Characteristics of floccules of clay-salt sludge formed by polyacrylamide and its copolymers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 5. P. 19-25 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206305.6086.
 22. **Archambo M., Kawatra S.K.** Red mud: Fundamentals and new avenues for utilization. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 2021. V. 42. N 7. P. 427-450. DOI: 10.1080/08827508.2020.1781109.
 23. **Charan K., Bhattacharyya P.** Vermicomposted red mud—An up-and-coming approach towards soil fertility and crop quality. *J. Crop Weed*. 2023. V. 19. N 2. P. 36-51. DOI: 10.22271/09746315.2023.v19.i2.1701.
 24. **Naja G.M., Volesky B.** Toxicity and sources of Pb, Cd, Hg, Cr, As, and radionuclides in the environment. Handbook of advanced industrial and hazardous wastes management. Florida: Crc Press. 2017. P. 855-903. DOI: 10.1201/9781315117423-27.
 25. **Khairul M.A., Zanganeh J., Moghtaderi B.** The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud. *Resour.* hydroxide. *Gorn. Inform-Analit. Zhurn. (Nauch.-Tekhn. Zhurn.)*. 1995. N 2. P. 99-102 (in Russian).
 8. <https://www.statista.com/statistics/264963/global-alumina-production-by-country/> (online on 02.04.2024)
 9. **Yurkov A.L., Kuroshev I.S., Dobrokhotova M.V.** Aluminum production. M.: Renome. 2020. 110 p. (in Russian).
 10. **Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Penyugalova N.P.** Alumina production technology. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. unta. 2015. 336 p. (in Russian).
 11. **Samal S.** Utilization of Red Mud as a Source for Metal Ions—A Review. *Materials*. 2021. V. 14. N 9. P. 2211. DOI: 10.3390/ma14092211.
 12. **Medvedev A.S., Kirov S.S., Khairullina R.T., Suss A.G.** Carbonation leaching of scandium from red mud using preliminary gasification of the pulp with carbon dioxide. *Non-ferrous Metals*. 2016. N 6. P. 67-73. DOI: 10.17580/tsm.2016.06.09.
 13. **Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N.** Trends in red mud utilization—a review. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 2004. V. 26. N 1. P. 1-29. DOI: 10.1080/08827500490477603.
 14. **Sutar H., Mishra S.C., Sahoo S., Chakraverty A.P., Maharana H.S.** Progress of red mud utilization: An overview. *Am. Chem. Sci. J.* 2014. V. 4. N 3. P. 255-279. DOI: 10.9734/ACSJ/2014/7258.
 15. **Patel S., Pal B.K.** Current status of an industrial waste: red mud an overview. *Ijltemas*. 2015. V. 4. N 8. P. 1-16.
 16. **Reddy P.S., Reddy N.G., Serjun V.Z., Mohanty B., Das S.K., Reddy K.R., Rao B.H.** Properties and assessment of applications of red mud (bauxite residue): current status and research needs. *Waste Biomass Valorization*. 2021. V. 12. P. 1185-1217. DOI: 10.1007/s12649-020-01089-z.
 17. **Rai S., Wasewar K.L., Mukhopadhyay J., Yoo C.K., Uslu H.** Neutralization and utilization of red mud for its better waste management. *Arch. Environ. Sci.* 2012. V. 6. P. 13–33.
 18. **Reddy N.G., Rao B.H., Reddy K.R.** Biopolymer amendment for mitigating dispersive characteristics of red mud waste. *Geotech. Lett.* 2018. V. 8. N 3. P. 201–207. DOI: 10.1680/jgele.18.00033.
 19. **Paramguru R.K., Rath P.C., Misra V.N.** Trends in red mud utilization—a review. *Min. Process. Extr. Metall. Rev.* 2005. V. 26. N 1. P. 1–29. DOI: 10.1080/08827500490477603.
 20. **Kirichenko A.G., Nasekan Yu.P., Kolesnik N.F.** Influence of the granulometric composition of red mud on the kinetics of carburization. *Vestn. NTI «KHPI»*. 2011. N 33. P. 7-11 (in Russian).
 21. **Rakhimova O.V., Seredkina O.R., Lanovetskiy S.V.** Characteristics of floccules of clay-salt sludge formed by polyacrylamide and its copolymers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 5. P. 19-25 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206305.6086.
 22. **Archambo M., Kawatra S.K.** Red mud: Fundamentals and new avenues for utilization. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 2021. V. 42. N 7. P. 427-450. DOI: 10.1080/08827508.2020.1781109.
 23. **Charan K., Bhattacharyya P.** Vermicomposted red mud—An up-and-coming approach towards soil fertility and crop quality. *J. Crop Weed*. 2023. V. 19. N 2. P. 36-51. DOI: 10.22271/09746315.2023.v19.i2.1701.
 24. **Naja G.M., Volesky B.** Toxicity and sources of Pb, Cd, Hg, Cr, As, and radionuclides in the environment. Handbook of advanced industrial and hazardous wastes management. Florida: Crc Press. 2017. P. 855-903. DOI: 10.1201/9781315117423-27.
 25. **Khairul M.A., Zanganeh J., Moghtaderi B.** The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud. *Resour.*

25. **Khairul M.A., Zanganeh J., Moghtaderi B.** The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud. *Resour. Conserv. Recycl.* 2019. V. 141. P. 483-498. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.11.006.
26. **Иванков С.И., Шубов Л.Я., Троицкий А.В., Каплин А.И.** Рациональные запатентованные технологии переработки и утилизации твердых промышленных отходов. Обзор. Часть 3. *Пробл. окр. среды и природ. ресурсов.* 2022. № 9. С. 3-116. DOI: 10.36535/0235-5019-2022-09-1.
27. **Babel A.** Dosing of pigments for coloring sand-lime brick. *Construct. Mater.* 2012. N 9. P. 22-24.
28. **Atan E., Sutcu M., Cam A.S.** Combined effects of bayer process bauxite waste (red mud) and agricultural waste on technological properties of fired clay bricks. *J. Build. Eng.* 2021. V. 43. P. 103194. DOI: 10.1016/j.job.2021.103194.
29. **Putrevu M., Thiyagarajan J.S., Pasla D., Kabeer K.I.S.A., Bisht K.** Valorization of red mud waste for cleaner production of construction materials. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste.* 2021. V. 25. N 4. P. 03121002. DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000629.
30. **Patangia J., Saravanan T.J., Kabeer K.I.S.A., Bisht K.** Study on the utilization of red mud (bauxite waste) as a supplementary cementitious material: Pathway to attaining sustainable development goals. *Construct. Build. Mater.* 2023. V. 375. P. 131005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131005.
31. **Tang W., Khavarian M., Yousefi A.** Red Mud. Sustainable concrete made with ashes and dust from different sources. Boston: Woodhead Publ. 2022. P. 577-606. DOI: 10.1016/B978-0-12-824050-2.00013-9.
32. **Liu Y., Naidu R., Ming H.** Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. *Geoderma.* 2011. V. 163. N 1-2. P. 1-12. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.04.002.
33. **Бу С.М., Нгуен Т.З., Нгуен В.Д., Бун К.Ч., Ле Т.М.Х.** Исследование адсорбции фтор-ионов на поверхности активированного серной кислотой красного шлама Вьетнама. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 3. С. 108-112. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5868a.
34. **Wang S., Ang H.M., Tadé M.O.** Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. *Chemosphere.* 2008. V. 72. N 11. P. 1621-1635. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.013.
35. **Xue S., Zhu F., Kong X., Wu C., Huang L., Huang N., Hartley W.** A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (Red mud). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. V. 23. P. 1120-1132. DOI: 10.1007/s11356-015-4558-8.
36. **Jiang X., Zhang X., Cheng G., Liu J.** Assessing the potential of red mud and dehydrated mineral mud mixtures as soil matrix for revegetation. *J. Environ. Manag.* 2023. V. 344. P. 118393. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118393.
37. **Kumar A.** Red mud (RM) and soil amelioration: improvement in soil quality. *Amelioration Technology for Soil Sustainability.* USA: IGI Global. 2019. P. 151-167. DOI: 10.4018/978-1-5225-7940-3.ch009.
38. **Zhou R., Liu X., Luo L., Zhou Y., Wei J., Chen A., Tang L., Wu H., Deng Y., Zhang F., Wang Y.** Remediation of Cu, Pb, Zn and Cd-contaminated agricultural soil using a combined red mud and compost amendment. *Int. Biodeterior. Biodegradation.* 2017. V. 118. P. 73-81. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.01.023.
39. **Tsivadze A.Yu.** Selective separation of chemical elements of the periodic table with similar properties is the basis of new technologies. *Vestn. Ross. Akad. Nauk.* 2020. V. 90. N 4. P. 320-330 (in Russian). DOI: 10.31857/S0869587320040167.
40. **Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Gerven T.V.** Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): a review. *J. Sustain. Conserv. Recycl.* 2019. V. 141. P. 483-498. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.11.006.
26. **Ivankov S.I., Shubov L.Ya., Troitsky A.V., Kaplin A.I.** Rational patented technologies for processing and disposal of solid industrial waste. Review. Part 3. *Probl. Okrugh. Sredy Prirod. Resursov.* 2022. N 9. P. 3-116 (in Russian). DOI: 10.36535/0235-5019-2022-09-1.
27. **Babel A.** Dosing of pigments for coloring sand-lime brick. *Construct. Mater.* 2012. N 9. P. 22-24.
28. **Atan E., Sutcu M., Cam A.S.** Combined effects of bayer process bauxite waste (red mud) and agricultural waste on technological properties of fired clay bricks. *J. Build. Eng.* 2021. V. 43. P. 103194. DOI: 10.1016/j.job.2021.103194.
29. **Putrevu M., Thiyagarajan J.S., Pasla D., Kabeer K.I.S.A., Bisht K.** Valorization of red mud waste for cleaner production of construction materials. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste.* 2021. V. 25. N 4. P. 03121002. DOI: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000629.
30. **Patangia J., Saravanan T.J., Kabeer K.I.S.A., Bisht K.** Study on the utilization of red mud (bauxite waste) as a supplementary cementitious material: Pathway to attaining sustainable development goals. *Construct. Build. Mater.* 2023. V. 375. P. 131005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131005.
31. **Tang W., Khavarian M., Yousefi A.** Red Mud. Sustainable concrete made with ashes and dust from different sources. Boston: Woodhead Publ. 2022. P. 577-606. DOI: 10.1016/B978-0-12-824050-2.00013-9.
32. **Liu Y., Naidu R., Ming H.** Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. *Geoderma.* 2011. V. 163. N 1-2. P. 1-12. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.04.002.
33. **Vu X.M., Nguyen T.D., Nguyen V.G., Bui C.T., Le T.M.H.** Study on adsorption of fluoride ion onto Vietnamese red mud activated with sulfuric acid. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2019. V. 62. N 3. P. 108-112 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5868a.
34. **Wang S., Ang H.M., Tadé M.O.** Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. *Chemosphere.* 2008. V. 72. N 11. P. 1621-1635. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.013.
35. **Xue S., Zhu F., Kong X., Wu C., Huang L., Huang N., Hartley W.** A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (Red mud). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. V. 23. P. 1120-1132. DOI: 10.1007/s11356-015-4558-8.
36. **Jiang X., Zhang X., Cheng G., Liu J.** Assessing the potential of red mud and dehydrated mineral mud mixtures as soil matrix for revegetation. *J. Environ. Manag.* 2023. V. 344. P. 118393. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118393.
37. **Kumar A.** Red mud (RM) and soil amelioration: improvement in soil quality. *Amelioration Technology for Soil Sustainability.* USA: IGI Global. 2019. P. 151-167. DOI: 10.4018/978-1-5225-7940-3.ch009.
38. **Zhou R., Liu X., Luo L., Zhou Y., Wei J., Chen A., Tang L., Wu H., Deng Y., Zhang F., Wang Y.** Remediation of Cu, Pb, Zn and Cd-contaminated agricultural soil using a combined red mud and compost amendment. *Int. Biodeterior. Biodegradation.* 2017. V. 118. P. 73-81. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.01.023.
39. **Tsivadze A.Yu.** Selective separation of chemical elements of the periodic table with similar properties is the basis of new technologies. *Vestn. Ross. Akad. Nauk.* 2020. V. 90. N 4. P. 320-330 (in Russian). DOI: 10.31857/S0869587320040167.
40. **Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Gerven T.V.** Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): a review. *J. Sustain.*

40. **Borra C.R., Blanpain B., Pontikes Y., Binnemans K., Gerven T.V.** Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): a review. *J. Sustain. Metall.* 2016. V. 2. P. 365-386. DOI: 10.1007/s40831-016-0068-2.
41. **Wang L., Sun N., Tang H., Sun W.** A review on comprehensive utilization of red mud and prospect analysis. *Minerals.* 2019. V. 9. N 6. P. 362. DOI: 10.3390/min9060362.
42. **Sushil S., Batra V.S.** Catalytic applications of red mud, an aluminium industry waste: A review. *Appl. Catal. B: Environ.* 2008. V. 81. N 1-2. P. 64-77. DOI: 10.1016/j.apcatb.2007.12.002.
43. **Liu Q., Xin R., Li C., Xu C., Yang J.** Application of red mud as a basic catalyst for biodiesel production. *J. Environ. Sci.* 2013. V. 25. N 4. P. 823-829. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60067-9.
44. **de Sousa Cordeiro E., Scaratti G., Soares de Souza D.C., Nickel C.D.M., Jose H.J., Moreira R.F.P.M., Junior A.D.N.** Red mud as catalyst for the treatment of pharmaceuticals compounds by advanced oxidation processes—A review. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2024. V. 21. P. 100938. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100938.
45. **Шарафеев С.М., Сергеев Н.П., Меженин А.В.** Влияние оксидов магния и железа на процессы фазообразования и спекания анортитовых материалов на основе природного сырья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 4. С. 101-107. DOI: 10.6060/ivkkt.20246704.6940.
46. **Докучаев И.С., Максимов Н.М., Тыщенко В.А.** Исследование процесса термического крекинга в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва).* 2022. Т. LXVI. № 1. С. 57-65. DOI: 10.6060/rcj.2022661.8.
47. **Das B., Mohanty K.** A review on advances in sustainable energy production through various catalytic processes by using catalysts derived from waste red mud. *Renew. Energy.* 2019. V. 143. P. 1791-1811. DOI: 10.1016/j.renene.2019.05.114.
48. **Araujo R.O., Santos V.O., Ribeiro F., Chaar J.S., Pereira A.M., Falcao N.P.S., Souza L.K.C.** Magnetic acid catalyst produced from acai seeds and red mud for biofuel production. *Energy Convers. Manag.* 2021. V. 228. P. 113636. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113636.
- Metall.* 2016. V. 2. P. 365-386. DOI: 10.1007/s40831-016-0068-2.
41. **Wang L., Sun N., Tang H., Sun W.** A review on comprehensive utilization of red mud and prospect analysis. *Minerals.* 2019. V. 9. N 6. P. 362. DOI: 10.3390/min9060362.
42. **Sushil S., Batra V.S.** Catalytic applications of red mud, an aluminium industry waste: A review. *Appl. Catal. B: Environ.* 2008. V. 81. N 1-2. P. 64-77. DOI: 10.1016/j.apcatb.2007.12.002.
43. **Liu Q., Xin R., Li C., Xu C., Yang J.** Application of red mud as a basic catalyst for biodiesel production. *J. Environ. Sci.* 2013. V. 25. N 4. P. 823-829. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60067-9.
44. **de Sousa Cordeiro E., Scaratti G., Soares de Souza D.C., Nickel C.D.M., Jose H.J., Moreira R.F.P.M., Junior A.D.N.** Red mud as catalyst for the treatment of pharmaceuticals compounds by advanced oxidation processes—A review. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2024. V. 21. P. 100938. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100938.
45. **Sharafeev S.M., Sergeev N.P., Mezhenin A.V.** Magnesium and iron oxides influence on sintering processes and phase formation of anorthite ceramics based on natural raw materials. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2024. V. 67. N 4. P. 101-107. DOI: 10.6060/ivkkt.20246704.6940.
46. **Dokuchaev I.S., Maximov N.M., Tyshchenko V.A.** Investigation of the thermal cracking process in the presence of a regenerated spent hydrotreating catalyst. *Ros. Khim. Zh.* 2022. V. LXVI. N 1. P. 57-65 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2022661.8.
47. **Das B., Mohanty K.** A review on advances in sustainable energy production through various catalytic processes by using catalysts derived from waste red mud. *Renew. Energy.* 2019. V. 143. P. 1791-1811. DOI: 10.1016/j.renene.2019.05.114.
48. **Araujo R.O., Santos V.O., Ribeiro F., Chaar J.S., Pereira A.M., Falcao N.P.S., Souza L.K.C.** Magnetic acid catalyst produced from acai seeds and red mud for biofuel production. *Energy Convers. Manag.* 2021. V. 228. P. 113636. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113636.

Поступила в редакцию 24.05.2024

Принята к опубликованию 22.07.2024

Received 24.05.2024

Accepted 22.07.2024