



Оригинальная статья

УДК 669.054.82, 669.713.6.05

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-806-813

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2435>

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ АЛЮМОКАЛЬЦИЕВОГО ШЛАКА НА ЕГО РАССЫПАЕМОСТЬ

А. Б. Лебедев, В. С. Шуйская

Санкт-Петербургский горный университет (Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2)

Аннотация. Основным компонентом металлургических шлаков являются соединения железа, которые извлекаются проведением восстановительной плавки. Известно несколько типов данного процесса с получением различных продуктов на основе железа и шлаков разного состава (алюмокальциевого саморассыпающегося и др.). Режим плавки и охлаждения образованного в процессе плавки в печи алюмокальциевого шлака должен обеспечивать наиболее полное самопроизвольное его рассыпание, а также высокие показатели извлечения из него редкоземельных металлов. Для опытов в работе выбраны синтетические шлаки, схожие по фазовому составу с промышленными образцами после выплавки железосодержащих руд. Смоделированные образцы соответствуют области первичной кристаллизации двухкальциевого силиката на тройной диаграмме состояния системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$. Шлак после рассыпания подвергали ситовому анализу с помощью механического сита. В опытах использовались шлаки с кремниевым модулем $k = 2,0$, которые активно рассыпались в момент их охлаждения. При увеличении кремниевых модуля рассыпаемость ухудшается. Установлено, что точно ограничить области составов рассыпающихся шлаков при определенных скоростях охлаждения невозможно. Проведенные исследования показали, что рассыпаемость шлаков улучшается по мере приближения к центру области двухкальциевого силиката. Состав шлаков близок к составу точек, расположенных в области, ограниченной с одной стороны линиями $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ и $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, и с другой стороны линиями кремниевых модуля не выше $2,85 - 3,00$. При этом гранулометрический состав почти не зависит от скорости охлаждения. На рассыпаемость шлаков влияет температурный режим от выплавки до охлаждения. Наиболее перспективными являются шлаки с кремниевым модулем в пределах $2,85 - 3,00$, близкие к фазовому треугольнику $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$.

Ключевые слова: металлургический шлак, алюмокальциевый силикат, скорость охлаждения, рассыпаемость шлака, кремниевый модуль, ситовой анализ, гранулометрический состав

Для цитирования: Лебедев А.Б., Шуйская В.С. Влияние состава и скорости охлаждения алюмокальциевого шлака на его рассыпаемость // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 806–813. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-806-813>

Original article

INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND COOLING RATE OF ALUMOCALCIUM SLAG ON ITS CRUMBLABILITY

A. B. Lebedev, V. S. Shuiskaya

St. Petersburg Mining University (2 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg 199106, Russian Federation)

Abstract. The main components of metallurgical slags are iron compounds, which are extracted by reduction smelting. The process of obtaining various products based on iron and slags of different compositions (alumocalcium self-crumbling, etc.) can be implemented in several ways. It is important to use a mode of smelting and cooling of the alumocalcium slag formed during melting in the furnace that ensures its most complete spontaneous crumbling and high rates of extraction of REM from it. Synthetic slags having a phase composition similar to industrial samples after the smelting of iron ores were selected for the experiments. The simulated samples correspond to the dicalcium silicate primary crystallisation region on the ternary phase diagram of the $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ system. After crumbling, the slag was subjected to sieve analysis using a mechanical sieve. Slags with a silicon modulus $k = 2.0$ that actively crumbled during cooling were used in the experiments. A higher silicon modulus results in a lower crumblability. It was established that it is impossible to precisely limit the composition areas of the crumbling slags at specific cooling rates. The studies showed that the crumblability of slags improves when moving towards the centre of the dicalcium silicate region. The composition of the slags is close to the composition of the points located in the area bounded by the lines $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ and $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ on one side and by the lines of the silicon modulus no higher than $2.85 - 3.00$ on the other side. The granulometric composition is almost independent of the cooling rate. The temperature mode from smelting to cooling affects the crumblability of the slags. The most promising are slags with a silicon modulus in the range of $2.85 - 3.00$ close to the phase triangle $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$.

Keywords: metallurgical slag, alumocalcium silicate, cooling rate, slag crumblability, silicon module, sieve analysis, granulometric composition

For citation: Lebedev A.B., Shuiskaya V.S. Influence of the composition and cooling rate of alumocalcium slag on its crumblability. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 806–813. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-806-813>

ВВЕДЕНИЕ

Предложенная схема комплексной переработки бокситового сырья [1–3] во вращающихся печах предполагает получение саморассыпающихся алюмокальциевых шлаков, пригодных для извлечения из них редкоземельных металлов (РЗМ) [4, 5], и перевод железа в отдельную фазу шлака [6, 7].

Режим термообработки и последующего охлаждения выпущенного из печи шлака должен обеспечивать полное самопроизвольное его рассыпание [8–10], которое в перспективе может способствовать извлечению из него ценных компонентов, таких как титан, скандий, иттрий и т. п. [11, 12]. Важнейшими технологическими факторами, определяющими фазовые превращения в шлаке, являются его химический состав и скорость охлаждения [13–15].

Для сырья с большим содержанием SiO_2 разрабатываются альтернативные способы извлечения РЗМ [16–18]. Шлаки с кремниевым модулем 2,0 типичны для комплексной переработки, они наиболее ярко демонстрируют изменения в гранулометрическом составе после саморассыпания [19]. Полное саморассыпание образца возможно подбором режима термообработки и охлаждения для каждого состава отдельно [20, 21]. При этом важную роль играет стабильность системы, которую можно оценить на тройной диаграмме состояния [22, 23].

Согласно этим ограничениям, шлаки с кремниевым модулем 2,85 не должны рассыпаться при охлаждении со скоростью $30^\circ\text{C}/\text{мин}$. В опытах, проведенных в работах [24, 25], часть шлаков с указанным кремниевым модулем легко рассыпалась с предложенной скоростью. Это показывает, что область, в которой происходит рассыпание, ограничена индивидуальными условиями для каждого образца (соотношение фаз и модуля) [26, 27]. Результат рассыпания зависит от термического режима (температура спекания, выдержка и скорость охлаждения состава) [28].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались синтетические шлаки, фазовый состав которых соответствовал составу реальных шлаков, полученных в результате плавки железистых высококремниевых бокситов, а также железосодержащих руд [29]. На тройной диаграмме состояния системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ выбранные составы шлаков соответствуют области первичной кристаллизации двухкальциевого силиката [30–32]. На рис. 1 представлены составы шлаков с различными кремниевыми модулями ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) [33–35]. Шлаки, выплавляемые в графитовом тигле в печи Таммана, после охлаждения рассыпаются или измельчаются, тщательно перемешиваются. От усредненной пробы отбирали навеску по 70 г, затем их помещали в графитовый тигель специаль-

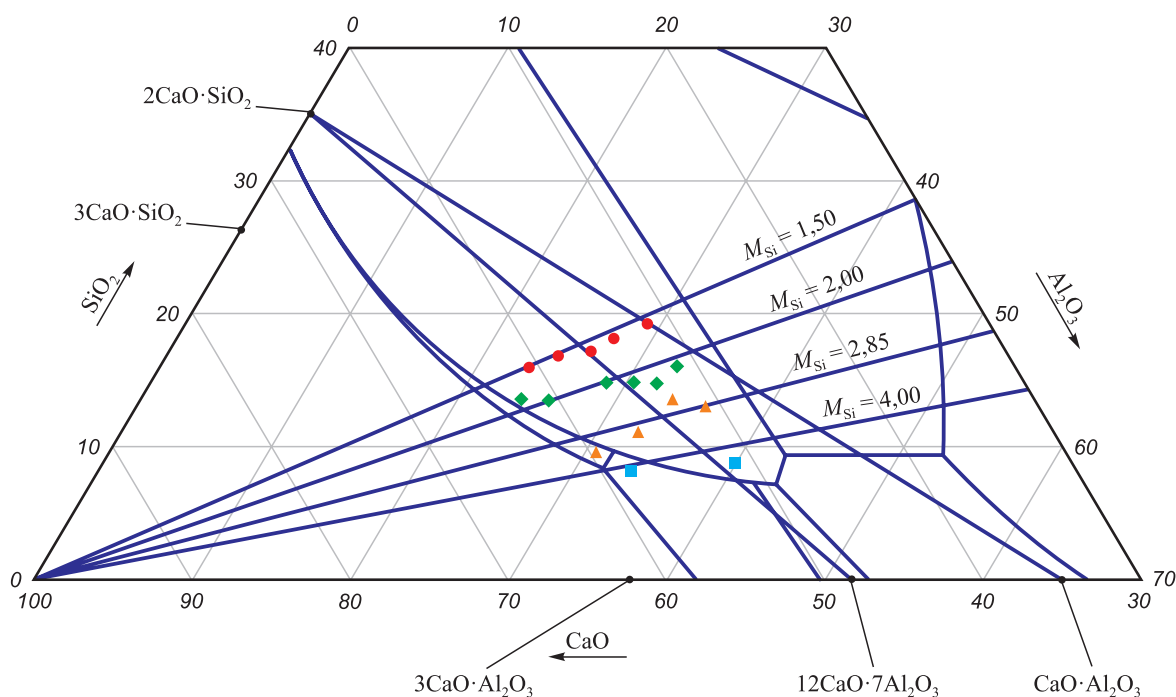


Рис. 1. Составы исследованных синтетических шлаков:

● – шлаки с кремниевым модулем 1,50; ◆ – шлаки с кремниевым модулем 2,00;
▲ – шлаки с кремниевым модулем 2,85; ■ – шлаки с кремниевым модулем 4,00 [38–40]

Fig. 1. Compositions of the studied synthetic slags:

● – slags with a silicon module of 1.50; ◆ – slags with a silicon module of 2.00;
▲ – slags with a silicon module of 2.85; ■ – slags with a silicon module of 4.00 [38–40]

Таблица 1

Гранулометрический состав шлаков с кремниевым модулем 2,0 после охлаждения, %

Table 1. Granulometric composition of the slags with silicon module 2.0 after cooling, %

Состав шлака, %	Класс, мм	Скорость охлаждения, °С/мин			
		3	7	15	30
CaO = 51,5; SiO ₂ = 15,5; Al ₂ O ₃ = 33,0	+0,400	–	23,6	23,4	–
	0,400 – 0,315	–	13,1	8,6	–
	0,315 – 0,200	0,4	22,9	23,0	12,6
	0,200 – 0,160	1,4	8,8	7,7	13,3
	0,160 – 0,100	13,4	9,4	10,2	21,7
	0,100 – 0,063	30,8	9,0	10,4	21,1
	0,063 – 0,050	14,9	3,8	5,0	9,5
	–0,050	39,1	9,6	11,8	21,4
Итого		100,0	100,0	100,0	100,0

ной конструкции и нагревали до 1500 °С. Температуру плавления ферросплавов можно снижать путем ввода в них таких элементов, как алюминий [36, 37].

После выдержки при заданной температуре в течение 15 мин шлаки охлаждали со скоростями, указанными ниже, до температуры 900 °С, выдерживали 15 мин и затем извлекали из печи. Дальнейшее охлаждение шлака проводили на воздухе до комнатной температуры. Шлак после рассыпания подвергали ситовому анализу на наборе стандартных сит Retsch AS 200. На представленной тройной диаграмме состояния визуально наблюдаются области составов шлака, ограниченных линиями различных кремниевых модулей (Al₂O₃/SiO₂). Регулирование температуры в печи производилось автоматически с точностью ±5 °С.

47 – 60 % CaO, 30 – 40 % Al₂O₃, рассыпаются при охлаждении со скоростью 15 °С/мин в том же интервале температур, а шлаки, содержащие 14 % SiO₂, 51 – 60 % CaO – в интервале температур от ликвидуса до комнатной. Полностью рассыпавшиеся шлаки целиком проходят сквозь сито с размером ячейки 100 мкм.

Получение оптимальной фазы может быть достигнуто при избыточных количествах кремния в исходной смеси [44].

Установлено, что на рассыпаемость шлаков влияет температура выплавки и нижний предел охлаждения. В табл. 2 приведен гранулометрический состав шлака одного химического состава, нагретого до разных температур (1300, 1350, 1400 и 1600 °С), и охлажденного со скоростью 30 °С/мин до комнатной температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 представлены результаты ситовых анализов охлажденных шлаков с кремниевым модулем 2,0. Для иллюстрации полученных закономерностей не случайно выбраны шлаки с кремниевым модулем 2,0.

В работе изучалось влияние различных факторов на рассыпаемость шлаков. Скорость охлаждения и химический (следовательно, и фазовый) состав шлаков оказывают существенное влияние на рассыпаемость. На диаграмме состояния системы CaO – SiO₂ – Al₂O₃ были найдены области составов шлаков, для самопроизвольного распада которых требуются определенные скорости охлаждения [41 – 43].

Скорость охлаждения 2 °С/мин от точки ликвидуса до 1000 °С обеспечивает рассыпаемость всех шлаков в области кристаллизации двухкальциевого силиката. Шлаки, содержащие 6 – 9 % SiO₂, 52 – 58 % CaO, 30 – 37 % Al₂O₃, при охлаждении со скоростью 7 °С/мин рассыпаются в интервале температур от ликвидуса до 1000 °С. Шлаки, содержащие 9 – 14 % SiO₂,

Гранулометрический состав шлака, охлажденного с одинаковой скоростью, %

Table 2. Granulometric composition of the slag cooled at the same rate, %

Класс, мм	Температура нагрева, °С			
	1300	1350	1400	1600
+0,400	–	3,1	3,2	5,4
0,400 – 0,315	–	1,1	1,1	0,4
0,315 – 0,200	–	7,2	7,9	5,8
0,200 – 0,160	16,5	16,9	9,4	5,4
0,160 – 0,100	12,3	8,8	3,6	10,5
0,100 – 0,063	19,1	11,7	13,7	18,5
0,063 – 0,050	13,8	12,1	8,3	10,1
–0,050	38,3	39,0	52,5	43,8
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0

Таблица 2

Таблица 3

Гранулометрический состав шлака,
охлажденного с одинаковой скоростью от 1500 °С
до указанных температур, %

Table 3. Granulometric composition of the slag cooled
at the same rate from 1500 °С to the specified temperatures, %

Класс, мм	Температура охлаждения, °С				
	700	800	900	1000	1100
+0,400	—	—	—	—	36,4
0,400 – 0,315	—	—	—	—	1,1
0,315 – 0,200	—	—	0,9	0,6	3,6
0,200 – 0,160	—	—	1,3	2,4	2,7
0,160 – 0,100	0,9	0,8	8,9	11,4	9,5
0,100 – 0,063	15,1	15,4	23,6	23,5	11,0
0,063 – 0,050	19,0	18,5	16,3	15,4	8,2
–0,050	65,0	65,8	48,9	46,8	27,9
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранулометрический и химический составы шлаков указаны на рис. 2.

Проведенные исследования показали, что рассыпаемость шлаков повышается по мере продвижения от границ области двухкальциевого силиката к центру. Состав шлаков близок к составу точек, расположенных в области, ограниченной с одной стороны линиями $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$,

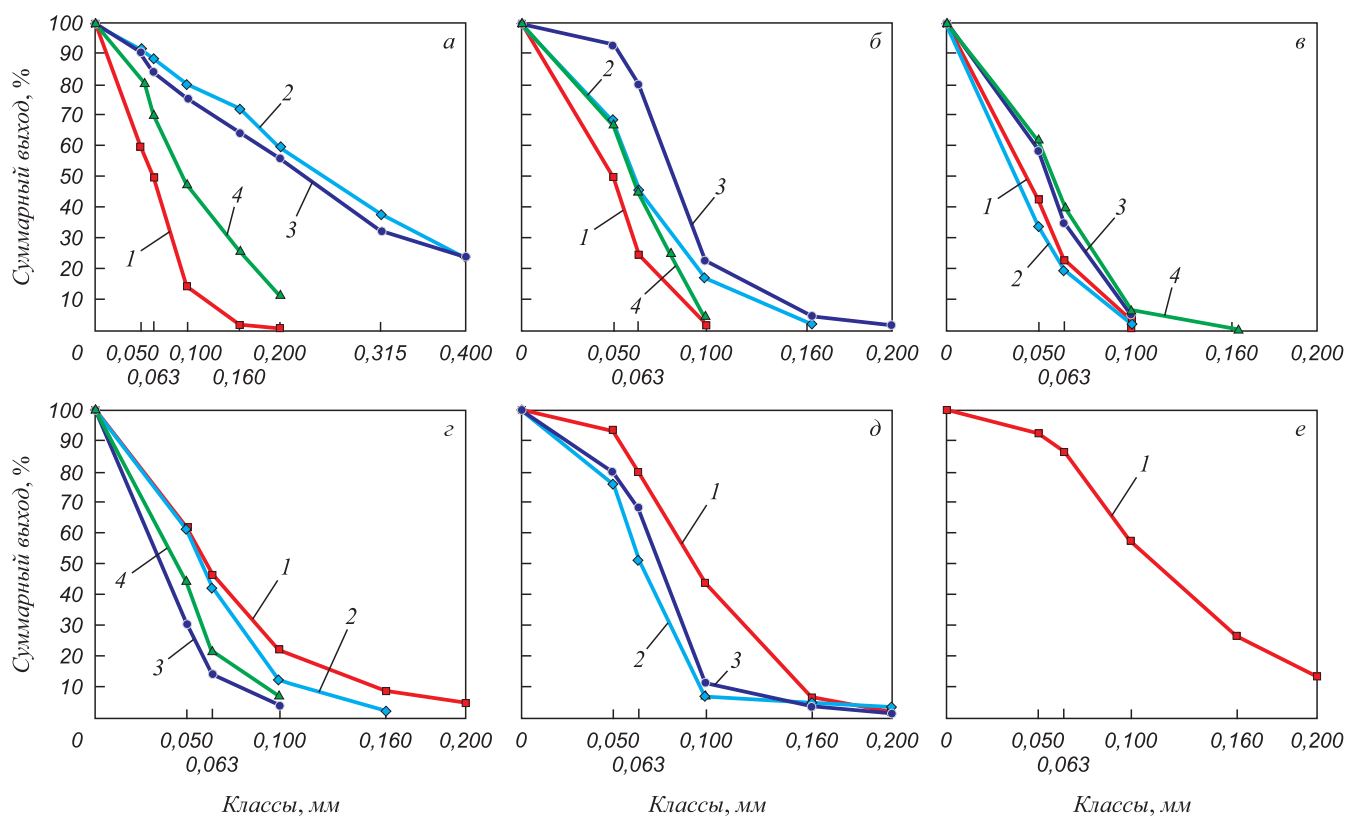


Рис. 2. Гранулометрический состав шлака, содержащего, %:

a – 51,5 CaO, 15,5 SiO₂, 33,0 Al₂O₃; *б* – 53,4 CaO, 14,1 SiO₂, 32,5 Al₂O₃; *в* – 56,5 CaO, 14,2 SiO₂, 29,3 Al₂O₃;
г – 54,4 CaO, 14,6 SiO₂, 30,9 Al₂O₃; *д* – 60,5 CaO, 13,2 SiO₂, 26,3 Al₂O₃; *е* – 62,6 CaO, 12,0 SiO₂, 25,4 Al₂O₃;
 1 – шлаки с кремниевым модулем 1,50; 2 – шлаки с кремниевым модулем 2,00; 3 – шлаки с кремниевым модулем 2,85;
 4 – шлаки с кремниевым модулем 4,00 [36 – 38]

Fig. 2. Granulometric composition of slag containing:

a – 51.5 CaO, 15.5 SiO₂, 33.0 Al₂O₃; *б* – 53.4 CaO, 14.1 SiO₂, 32.5 Al₂O₃; *в* – 56.5 CaO, 14.2 SiO₂, 29.3 Al₂O₃;
г – 54.4 CaO, 14.6 SiO₂, 30.9 Al₂O₃; *д* – 60.5 CaO, 13.2 SiO₂, 26.3 Al₂O₃; *е* – 62.6 CaO, 12.0 SiO₂, 25.4 Al₂O₃;
 1 – slags with silicon module 1.50; 2 – slags with silicon module 2.00; 3 – slags with silicon module 2.85;
 4 – slags with silicon module 4.00 [36 – 38]

и с другой стороны линиями кремниевого модуля не выше 2,85 – 3,00. Выявлено, что гранулометрический состав шлака почти не зависит от скорости его охлаждения [46].

По мере приближения к границам области двухкальциевого силиката, скорость охлаждения начинает существенно сказываться на гранулометрическом составе шлаков, что хорошо прослеживается на рис. 2.

Чем меньше скорость охлаждения шлаков, тем более точно выполняются условия равновесия кристаллизации. Ожидалось, что рассыпаемость шлака будет улучшаться с уменьшением скорости охлаждения.

Шлаки, охлажденные со скоростью 30 °С/мин, после рассыпания имеют гранулометрический состав мельче, чем шлаки того же химического состава, охлажденные со скоростью 7 и 15 °С/мин. Это явление, вероятно, вызывается образованием большего числа зародышей кристаллов при быстром охлаждении [47].

Следует также отметить, что рассыпаемость шлаков ухудшается с ростом кремниевого модуля. В проведенных авторами опытах рассыпался только один шлак с

кремниевым модулем 4,0 и только при скорости охлаждения 3 °С/мин.

Выводы

Скорость охлаждения и химический состав шлаков существенно влияют на их рассыпаемость. Она повышается с уменьшением скорости охлаждения и по мере удаления составов шлаков от границ области первичной кристаллизации двухкальциевого силиката. Однако с увеличением кремниевого модуля рассыпаемость снижается.

На гранулометрический состав рассыпавшихся шлаков большее влияние оказывает химический состав, чем скорость их охлаждения.

Исходя из полученных данных, с технологической точки зрения наиболее перспективными являются шлаки с кремниевым модулем не выше 2,85 – 3,00, состав которых находится внутри или близко к фазовому треугольнику, ограниченному линиями $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Баженов И.Н., Басов О.О. Метод индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 123–130. <https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.123>
2. Сизяков В.М., Бричкин В.Н. О роли гидрокарбоалюминатов кальция в усовершенствовании технологии комплексной переработки нефелинов // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 292–298. <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.3.292>
3. Хатъков В.Ю., Боярко Г.Ю. Административные методы управления импортозамещения дефицитных видов минерального сырья // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 683–692. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.683>
4. Зиновьев Д.В., Грудинский П.И., Дюбанов В.Г., Коваленко Л.В., Леонтьев Л.И. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 11. С. 843–858. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-843-858>
5. Волков А.И., Стулов П.Е., Леонтьев Л.И., Углов В.А. Анализ использования редкоземельных металлов в черной металлургии России и мира // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 6. С. 405–418. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-405-418>
6. Zubkova O., Alexeev A., Polyanskiy A., Karapetyan K., Kononchuk O., Reinmüller M. Complex processing of saponite waste from a diamond-mining enterprise // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 14. Article 6615. <https://doi.org/10.3390/app11146615>
7. Булаев А.Г., Меламуд В.С., Бодуэн А.Я. Высокотемпературное выщелачивание меди и цинка из некондиционного концентрата с высоким содержанием мышьяка // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12 (78). Часть 1. С. 72–76. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012>
8. Горланов Е.С., Бажин В.Ю., Федоров С.Н. Карботермический синтез диборида титана: апгрейд // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2018. № 11 (2). С. 156–166. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0065>
9. Баринкова А.А., Пириайнен В.Ю., Баринков В.М. Новый композиционный материал с нейтрализованным красным шламом // Информационно-технологический вестник. 2021. № 2(28). С. 156–169. <https://doi.org/10.21499/2409-1650-2021-28-2-156-169>
1. Bazhenov I.N., Basov O.O. Method of induction control of iron weight fraction in magnetite ore. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 230, pp. 123–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.123>
2. Sizyakov V.M., Brichkin V.N. About the role of hydrofated calcium carboaluminates in improving the technology of complex processing of nephelines. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 231, pp. 292–298. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.3.292>
3. Khat'kov V.Yu., Boyarko G.Yu. Administrative methods of import substitution management of deficient types of mineral raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 234, pp. 683–692. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.683>
4. Zinoveev D.V., Grudinskii P.I., Dyubanov V.G., Kovalenko L.V., Leont'ev L.I. Global recycling experience of red mud – a review. Part I: Pyrometallurgical methods. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 11, pp. 843–858. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-843-858>
5. Volkov A.I., Stulov P.E., Leont'ev L.I., Uglov V.A. Analysis of the use of rare earth metals in ferrous metallurgy of Russia and world. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 6, pp. 405–418. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-405-418>
6. Zubkova O., Alexeev A., Polyanskiy A., Karapetyan K., Kononchuk O., Reinmüller M. Complex processing of saponite waste from a diamond-mining enterprise. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 14, article 6615. <https://doi.org/10.3390/app11146615>
7. Bulaev A.G., Melamud V.S., Boduen A.Ya. High-temperature biox of copper and zinc from non-standard concentrate with high content of arsenic. *International Research Journal*. 2018, no. 12 (78), part 1, pp. 72–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012>
8. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. Carbothermic synthesis of titanium diboride: Upgrade. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2018, no. 11 (2), pp. 156–166. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0065>
9. Barinkova A.A., Piirainen V.Yu., Barinkov V.M. New composite material with neutralized red mud. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik*. 2021, no. 2(28), pp. 156–169. (In Russ.). <https://doi.org/10.21499/2409-1650-2021-28-2-156-169>

10. Гурьев А.А. Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогащательных мощностей АО «Апатит» на основе лучших инженерных решений // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 662–673. <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.6.662>
11. Бояринцев А.В., Степанов С.И., Хтет Йе Аунг, Маунг Маунг Аунг. Гидролитическое осаждение алюминия и скандия из щелочно-карбонатных растворов при переработке красных шламов // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 1 (211). С. 54–56.
12. Akcil A., Akhmadiyeva N., Abdulvaliyev R., Abhilash, Meshram P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: Focus on scandium // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2018. Vol. 39. No. 3. P. 145–151. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>
13. Капустина Г.Г., Римлянд В.И. Исследование воздействия непрерывного лазерного излучения на красный шлам // Вести научных достижений. Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 6–9.
14. Газалеева Г.И., Мамонов С.В., Братыгин Е.В., Ключников А.М. Проблемы и инновационные решения в обогащении техногенного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 1. С. 257–272.
15. Zhang J., Li P., Liang M., Jiang H., Yao Z., Zhang X., Yu S. Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 237. Article 117821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117821>
16. Балыков А.А., Левенец О.О., Хайнасова Т.С. Проточный биореактор для исследования бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд и концентратов // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 383–387. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.4.383>
17. Alkan G., Xakalashe B., Yagmurlu B., Kaussen F., Friedrich B. Conditioning of red mud for subsequent titanium and scandium recovery – a conceptual design study // World of Metallurgy – ERZMETAL. 2017. Vol. 70. No. 2. P. 84–91.
18. Рогачев М.К., Александров А.Н. Обоснование комплексной технологии предупреждения образования асфальтосмолапарафиновых отложений при добыче высокопарафинистой нефти погружными электроцентробежными насосами из многопластовых залежей // Записки Горного института. 2021. Т. 251. № 4. С. 596–605. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.13>
19. Archambo M., Kawatra S.K. Red mud: Fundamentals and new avenues for utilization // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021. Vol. 42. No. 7. P. 427–450. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1781109>
20. Никифоров А.Г., Ручьев А.М. Ресурсы граната и редких металлов на рудопроявлении «Высота-181» (Северная Карелия) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2019. № 10. С. 62–70. <http://dx.doi.org/10.17076/geo1104>
21. Smyshlyaeva K.I., Rudko V.A., Povarov V.G., Shaidulina A.A., Efimov I., Gabdulkhakov R.R., Pyagay I.N., Speight J.G. Influence of asphaltenes on the low-sulphur residual marine fuels' stability // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. No. 11. Article 1235. <https://doi.org/10.3390/jmse9111235>
22. Рис А.Д., Сундунов А.В., Дубовиков О.А. Поведение бокситовых концентратов на стадии выщелачивания по способу Байера // iPolytech Journal. 2019. Т. 23. № 2. С. 395–403. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-395-403>
23. Артеменков А.Г., Бычяня Ю.Г., Герасимова Л.Г., Николаев А.И. Сернокислотное разложение перовскита в присутствии добавок, повышающих устойчивость титана (IV) в жидкой фазе // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2–1. С. 121–124. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.121-124>
24. Geng J., Zhou M., Li Y., Chen Y., Han Y., Wan S., Zhou X., Hou H. Comparison of red mud and coal gangue blended geopolymers synthesized through thermal activation and mechanical grinding pre-activation // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 153. P. 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.045>
10. Gur'ev A.A. Sustainable development of crude ore resources and beneficiation facilities of JSC «Apatit» based on best engineering solutions. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 662–673. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.6.662>
11. Boyarintsev A.V., Stepanov S.I., Htet Ye Aung, Maung Maung Aung. Hydrolytic sedimentation of aluminium and scandium from alkaline-carbonate solutions after leaching of red mud. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019, vol. 33, no. 1 (211), pp. 54–56. (In Russ.).
12. Akcil A., Akhmadiyeva N., Abdulvaliyev R., Abhilash, Meshram P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: Focus on scandium. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018, vol. 39, no. 3, pp. 145–151. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>
13. Kapustina G.G., Rimlyand V.I. Research of the influence of continuous laser radiation on red mud. *Vesti nauchnykh dostizhenii. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2020, no. 1, pp. 6–9. (In Russ.).
14. Gazaleeva G.I., Mamonov S.V., Bratygin E.V., Klyushnikov A.M. Problems and innovation solution in technogenic raw material beneficiation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2017, no. 1, pp. 257–272. (In Russ.).
15. Zhang J., Li P., Liang M., Jiang H., Yao Z., Zhang X., Yu S. Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder. *Construction and Building Materials*. 2020, vol. 237, article 117821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117821>
16. Balykov A.A., Levenets O.O., Khainasova T.S. Flow bioreactor for studying bacterial-chemical leaching of sulfide copper-nickel ores and concentrates. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 232, pp. 383–387. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.4.383>
17. Alkan G., Xakalashe B., Yagmurlu B., Kaussen F., Friedrich B. Conditioning of red mud for subsequent titanium and scandium recovery – A conceptual design study. *World of Metallurgy – ERZMETAL*. 2017, vol. 70, no. 2, pp. 84–91.
18. Rogachev M.K., Aleksandrov A.N. Justification of a comprehensive technology for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits during the production of highlyparaffinic oil by electric submersible pumps from multiformation deposits. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 596–605. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.13>
19. Archambo M., Kawatra S.K. Red mud: Fundamentals and new avenues for utilization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021, vol. 42, no. 7, pp. 427–450. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1781109>
20. Nikiforov A.G., Ruchyov A.M. Garnet and rare-metals resources of the Vysota-181 ore occurrence, North Karelia. *Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019, no. 10, pp. 62–70. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17076/geo1104>
21. Smyshlyaeva K.I., Rudko V.A., Povarov V.G., Shaidulina A.A., Efimov I., Gabdulkhakov R.R., Pyagay I.N., Speight J.G. Influence of asphaltenes on the low-sulphur residual marine fuels' stability. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, vol. 9, no. 11, article 1235. <https://doi.org/10.3390/jmse9111235>
22. Ris A.D., Sundurov A.V., Dubovikov O.A. Bauxite concentrate behaviour at the leaching stage in the Bayer process. *iPolytech Journal*. 2019, vol. 23, no. 2, pp. 395–403. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-395-403>
23. Artemenkov A.G., Bychenya Yu.G., Gerasimova L.G., Nikolaev A.I. Sulfuric acid decomposition of perovskite in the presence of additives increasing the stability of titanium (IV) in the liquid phase. *Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2018, vol. 9, no. 2–1, pp. 121–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.121-124>
24. Geng J., Zhou M., Li Y., Chen Y., Han Y., Wan S., Zhou X., Hou H. Comparison of red mud and coal gangue blended geopolymers synthesized through thermal activation and mechanical grinding pre-activation. *Construction and Building Materials*. 2017, vol. 153, pp. 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.045>

25. Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Заякин О.В. Использование российского рудного сырья для производства ферросплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 3–4. С. 211–217. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-211-217>
26. Леонтьев Л.И., Цуканов В.В., Смирнова Д.Л. Роль Д.К. Чернова в создании и развитии учения о современной металлургии и металловедении. Часть 2. Научно-практическое подтверждение идей Д.К. Чернова // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11–12. С. 873–877. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-873-877>
27. Yang Z., Mocadlo R., Zhao M., Sisson R.D., Tao M., Liang J. Preparation of a geopolymer from red mud slurry and class F fly ash and its behavior at elevated temperatures // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 221. P. 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.034>
28. Agrawal S., Dhawan N. Investigation of mechanical and thermal activation on metal extraction from red mud // Sustainable Materials and Technologies. 2021. Vol. 27. Article e00246. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00246>
29. Jafarova S.T., Gahramanova E.B., Agayev A.I., Ahmadov M.M. Development and study of properties of contact masses on the basis of red mud // Azerbaijan Chemical Journal. 2017. No. 3. С. 28–33.
30. Alekseev K., Mymrin V., Avanci M.A., Klitzke W., Magalhães W.L.E., Silva P.R., Catai R.E., Silva D.A., Ferraz F.A. Environmentally clean construction materials from hazardous bauxite waste red mud and spent foundry sand // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 229. Article 116860. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116860>
31. Li Z., Zhang J., Li S., Lin C., Gao Y., Liu C. Feasibility of preparing red mud-based cementitious materials: Synergistic utilization of industrial solid waste, waste heat, and tail gas // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 285. Article 124896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124896>
32. Wang L., Chen L., Tsang D.C.W., Zhou Y., Rinklebe J., Song H., Kwon E.E., Baek K., Sik Ok Y. Mechanistic insights into red mud, blast furnace slag, or metakaolin-assisted stabilization/solidification of arsenic-contaminated sediment // Environment International. 2019. Vol. 133. Part B. Article 105247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105247>
33. Валеев Д.В., Зиновеев Д.В., Варнавская А.Д. Восстановительная плавка обесщелоченного красного шлака с получением металла и алюмосодержащего шлака // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10. № 1 (3). С. 44–51. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.44-51>
34. Лебедев А.Б., Утков В.А., Бажин В.Ю. Применение красного шлака в качестве модификатора при грануляции металлургических шлаков // iPolytech Journal. 2019. Т. 23. № 1 (144). С. 158–168. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-158-168>
35. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Kovalchuk O., Lapovska S., Pasko A. Design of the composition of alkali activated portland cement using mineral additives of technogenic origin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Т. 4. No. 6 (94). P. 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140324>
36. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Extraction of iron values from red mud // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. No. 9. Part 1. P. 17064–17072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>
37. Agrawal S., Dhawan N. Evaluation of red mud as a polymetallic source – A review // Minerals Engineering. 2021. Vol. 171. Article 107084. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107084>
38. Леонтьев Л.И., Жучков В.И., Заякин О.В., Сычев А.В., Михайлова Л.Ю. Перспективы получения и применения комплексных ниобиевых ферросплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 1. С. 10–20. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-10-20>
39. Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Растворимость кислорода в расплавах системы Ni – Co при комплексном раскислении алюминием и кремнием // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 11. С. 870–878. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-870-878>
25. Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Zayakin O.V. Application of Russian ore raw materials to ferroalloys production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 3–4, pp. 211–217. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-211-217>
26. Leont'ev L.I., Tsukanov V.V., Smirnova D.L. D.K. Chernov's role in creating and developing the doctrine of modern metallurgy and metal science. Part 2. Scientific and practical confirmation of D.K. Chernov's ideas. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11–12, pp. 873–877. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-873-877>
27. Yang Z., Mocadlo R., Zhao M., Sisson R.D., Tao M., Liang J. Preparation of a geopolymer from red mud slurry and class F fly ash and its behavior at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 221, pp. 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.034>
28. Agrawal S., Dhawan N. Investigation of mechanical and thermal activation on metal extraction from red mud. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021, vol. 27, article e00246. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00246>
29. Jafarova S.T., Gahramanova E.B., Agayev A.I., Ahmadov M.M. Development and study of properties of contact masses on the basis of red mud. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2017, no. 3, pp. 28–33.
30. Alekseev K., Mymrin V., Avanci M.A., Klitzke W., Magalhães W.L.E., Silva P.R., Catai R.E., Silva D.A., Ferraz F.A. Environmentally clean construction materials from hazardous bauxite waste red mud and spent foundry sand. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 229, article 116860. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116860>
31. Li Z., Zhang J., Li S., Lin C., Gao Y., Liu C. Feasibility of preparing red mud-based cementitious materials: Synergistic utilization of industrial solid waste, waste heat, and tail gas. *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 285, article 124896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124896>
32. Wang L., Chen L., Tsang D.C.W., Zhou Y., Rinklebe J., Song H., Kwon E.E., Baek K., Sik Ok Y. Mechanistic insights into red mud, blast furnace slag, or metakaolin-assisted stabilization/solidification of arsenic-contaminated sediment. *Environment International*. 2019, vol. 133, part B, article 105247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105247>
33. Valeev D.V., Zinoveev D.V., Varnavskaya A.D. Reductive smelting of neutralized red mud for iron and aluminum-containing slag production. *Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019, vol. 10, no. 1 (3), pp. 44–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.44-51>
34. Lebedev A.B., Utkov V.A., Bazhin V.Yu. Use of red mud as a modifier in granulation of metallurgical slags. *iPolytech Journal*. 2019, vol. 23, no. 1, pp. 158–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-158-168>
35. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Kovalchuk O., Lapovska S., Pasko A. Design of the composition of alkali activated portland cement using mineral additives of technogenic origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 4, no. 6 (94), pp. 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140324>
36. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Extraction of iron values from red mud. *Materials Today: Proceedings*. 2018, vol. 5, no. 9, part 1, pp. 17064–17072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>
37. Agrawal S., Dhawan N. Evaluation of red mud as a polymetallic source – A review. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 171, article 107084. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107084>
38. Leont'ev L.I., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Sychev A.V., Mikhailova L.Yu. Potential for obtaining and applying complex niobium ferroalloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 1, pp. 10–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-10-20>
39. Alexandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Oxygen solubility in melts of Ni – Co system at complex deoxidation by aluminum and silicon. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 11, pp. 870–878. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-870-878>

40. Hoc Thang N., Trung Kien P., Mohd Mustafa Al Bakri A. Light-weight heat resistant geopolymer-based materials synthesized from red mud and rice husk ash using sodium silicate solution as alkaline activator // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 97. No. 1. Article 01119. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701119>
41. Lis J., Chlubny L., Witulska K., Borowiak P., Kozak K., Misztal A., Czajkowska O. SHS of Ti_3SiC_2 -based materials in the Ti–Si–C system: Impact of silicon excess // *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2019. Vol. 28. P. 262–265. <https://doi.org/10.3103/S1061386219040083>
42. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д. Обоснование устойчивости внешних отвалов Кузбасса и мониторинг их состояния // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 4. С. 109–120. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120>
43. Podoprigora D., Raupov I. Research of the influence of polymeric drilling mud on the filtration-capacitive properties of polymictic sandstones // *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*. 2018. Vol. 63. P. 537–546.
44. Sultanbekov R., Beloglazov I., Islamov S., Ong M. Exploring of the incompatibility of marine residual fuel: A case study using machine learning methods // *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 24. Article 8422. <https://doi.org/10.3390/en14248422>
45. Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as Al_2O_3 – SiO_2 catalyst supports // *Catalysts*. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 162. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>
46. Mukiza E., Liu X., Zhang L., Zhang N. Preparation and characterization of a red mud-based road base material: Strength formation mechanism and leaching characteristics // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 220. P. 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.027>
47. Pereira Babiska M., Fonseca Amaral L., da Silva Ribeiro L., Fontes Vieira C.M., Soares do Prado U., Castoldi Borlini Gadioli M., Souza Oliveira M., Santos da Luz F., Neves Monteiro S., da Costa Garcia Filho F. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No. 2. P. 2186–2195. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.049>
40. Hoc Thang N., Trung Kien P., Mohd Mustafa Al Bakri A. Light-weight heat resistant geopolymer-based materials synthesized from red mud and rice husk ash using sodium silicate solution as alkaline activator. *MATEC Web of Conferences*. 2017, vol. 97, no. 1, article 01119. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701119>
41. Lis J., Chlubny L., Witulska K., Borowiak P., Kozak K., Misztal A., Czajkowska O. SHS of Ti_3SiC_2 -based materials in the Ti–Si–C system: Impact of silicon excess. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2019, vol. 28, pp. 262–265. <https://doi.org/10.3103/S1061386219040083>
42. Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Vasil'eva A.D. External dump stability substantiation and monitoring in Kuzbass. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2019, no. 4, pp. 109–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120>
43. Podoprigora D., Raupov I. Research of the influence of polymeric drilling mud on the filtration-capacitive properties of polymictic sandstones. *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*. 2018, vol. 63, pp. 537–546.
44. Sultanbekov R., Beloglazov I., Islamov S., Ong M. Exploring of the incompatibility of marine residual fuel: A case study using machine learning methods. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 24, article 8422. <https://doi.org/10.3390/en14248422>
45. Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as Al_2O_3 – SiO_2 catalyst supports. *Catalysts*. 2022, vol. 12, no. 2, pp. 162. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>
46. Mukiza E., Liu X., Zhang L., Zhang N. Preparation and characterization of a red mud-based road base material: Strength formation mechanism and leaching characteristics. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 220, pp. 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.027>
47. Pereira Babiska M., Fonseca Amaral L., da Silva Ribeiro L., Fontes Vieira C.M., Soares do Prado U., Castoldi Borlini Gadioli M., Souza Oliveira M., Santos da Luz F., Neves Monteiro S., da Costa Garcia Filho F. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, no. 2, pp. 2186–2195. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.049>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Борисович Лебедев, к.т.н., сотрудник научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет
ORCID: 0000-0002-8081-9301
E-mail: 2799957@mail.ru

Andrei B. Lebedev, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Scientific Center "Problems of Processing of Mineral and Technogenic Resources", St. Petersburg Mining University
ORCID: 0000-0002-8081-9301
E-mail: 2799957@mail.ru

Вера Сергеевна Шуйская, лаборант-исследователь научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет
ORCID: 0000-0003-2805-0010
E-mail: veraizabelshu@gmail.com

Vera S. Shuiskaya, Research Laboratory Assistant of the Scientific Center "Problems of Processing of Mineral and Technogenic Resources", St. Petersburg Mining University
ORCID: 0000-0003-2805-0010
E-mail: veraizabelshu@gmail.com

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. Б. Лебедев – научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.
В. С. Шуйская – формирование основной концепции, цели и задачи исследования; проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

A. B. Lebedev – scientific guidance, analysis of the research results, revision of the text, correction of conclusions.
V. S. Shuiskaya – formation of the basic concept, goals and objectives of the study; calculations, preparation of the text, formation of conclusions.

Поступила в редакцию 01.12.2021
 После доработки 12.05.2022
 Принята к публикации 26.05.2022

Received 01.12.2021
 Revised 12.05.2022
 Accepted 26.05.2022