

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА НА СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗИСТЫХ БОКСИТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В. И. Ростовцев

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: benevikt@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Исследовано влияние режимов термической обработки на магнитные свойства бокситов, приведены результаты сухой магнитной сепарации. Показано, что при повышении температуры в муфельной печи до 600 °С магнитная восприимчивость обработанных бокситов уменьшается. Радиационно-термическая модификация бокситов ускоренными электронами при тех же температурах позволяет усилить их магнитные свойства. Установлено, что результаты магнитной сепарации определяются характером и режимом термообработки. Найдены технологические режимы, при которых обеспечивается извлечение редких и редкоземельных элементов в магнитную фракцию.

Высокожелезистые бокситы, термическая обработка, обработка ускоренными электронами, магнитная восприимчивость, сухая магнитная сепарация, извлечение редких и редкоземельных элементов

DOI: 10.15372/FTPRPI20230112

Бокситы — один из важных видов стратегического минерального сырья. Россия располагает крупной сырьевой базой бокситов, большая часть которой представлена рудами низкого качества, что не позволяет обеспечить внутренние потребности страны в алюминиевом сырье за счет собственного производства. В разработку также вовлечены содержащие алюминий нефелиновые руды, нигде более в мире для получения алюминия не используемые. В 2020 г. в России добыто 6.65 млн т бокситов, включая 6.11 млн т металлургического сорта, и 37.30 млн т нефелиновых руд, из которых 3.12 млн т использовались в производстве металла. При этом разрабатывались семь месторождений бокситов, руды пяти из них применялись для получения металлургического глинозема [1].

Потребности российских алюминиевых заводов в сырье на две трети покрываются за счет импорта глинозема, в том числе с предприятий, принадлежащих Российской международной компании ПАО «Объединенная Компания «Русал» (МКПАО ОК «Русал»). По производству первичного алюминия Россия уступает только Китаю и является вторым после Канады мировым экспортером металла.

Повышение уровня обеспеченности российской алюминиевой промышленности собственным минеральным сырьем возможно только в результате разработки и внедрения в промышленное производство технологий переработки низкокачественного алюминиевого сырья, которое в стране имеется в изобилии, в металлургический глинозем. Работы в этом направлении ведутся компанией “Русал”, разработавшей алюмохлоридную технологию получения глинозема металлургического качества из каолиновых глин. По данной технологии в “Русал ВАМИ” (Всероссийский алюминиево-магниевый институт) на опытной установке получен металлургический глинозем, а также побочная продукция — каустическая сода, псевдобемит, аморфный кремнезем. По сравнению с получением глинозема из нефелинов этот способ при одинаковом расходе электроэнергии позволяет почти в 3 раза сократить расход топлива и общие энергозатраты, а также выбросы диоксида углерода. Значительно уменьшается выход шлама, а получение товарного глинозема увеличивается до 92 % [1].

В условиях использования низкокачественного природного и накопленного техногенного минерального сырья одним из наиболее важных направлений является разработка эффективных энергосберегающих технологий рудоподготовки и селективной дезинтеграции труднообогатимых руд и продуктов обогащения на базе результатов фундаментальных междисциплинарных исследований [2, 3].

Выполнение научных работ в направлении совершенствования существующих и создания новых перспективных методов и способов извлечения ценных компонентов из различного минерального сырья определяется необходимостью не только повышения полноты и комплексности использования месторождений твердых полезных ископаемых, но и обеспечения высокой рентабельности современного минерально-сырьевого комплекса страны и улучшения экологической ситуации в районах функционирования горных и горно-перерабатывающих предприятий [4, 5]. Расширение минерально-сырьевой базы страны, в том числе по ряду стратегически важных материалов, возможно на основе комбинированных интенсифицирующих технологий с использованием энергетических воздействий и новой модели флотации различного минерального сырья [6].

Цель настоящей работы — исследование особенностей минерального состава бокситов и поиск технологических процессов повышения извлечения алюминия и других дефицитных компонентов из железосодержащего алюминиевого сырья, в том числе из железистых бокситов, направленным изменением их физических и технологических свойств физико-химическими и энергетическими воздействиями. Следует отметить, что поиску перспективных методов извлечения полезных компонентов из труднообогатимого и техногенного сырья посвящены многочисленные исследования, результаты которых приведены в ряде работ отечественных и зарубежных ученых [7–19].

Месторождения бокситов Тиманского района (Республика Коми) являются одними из источников сырьевой базы алюминиевой промышленности нашей страны [1, 20]. Бокситы — сложная горная порода, алюминий в ней может находиться в виде различных соединений: диаспора, бемита, гиббсита. Часть алюминия может быть представлена корундом, каолинитом и другими минералами. В состав бокситов, как правило, входят: железо в виде водных и безводных окислов и карбонатов; кремний в виде кварца, опала, каолинита; титан в виде рутила, анатаза, сфена, титаномагнетита и других соединений. Возможно наличие карбонатов кальция и магния, соединений серы, фосфора, хрома. В небольших количествах присутствуют соединения редких элементов: ванадия, галлия, циркония, ниобия и др. Химический состав бокситов из разных месторождений, а также их физические свойства отличаются друг от друга. Общим является содержание в них Al_2O_3 , которое колеблется от 35 до 60 % и более, SiO_2 — от десятых долей до 25 %, Fe_2O_3 — от 2 до 40 %, TiO_2 — от следов до 11 %. Содержание ряда элементов в бокситах измеряется сотыми и даже тысячными долями процента.

Качество бокситов можно значительно повысить, если удалить из них вредные примеси (карбонаты, сульфиды, органические вещества), а также снизить содержание кремнезема, соединений железа, титана. Это особенно важно для низкокачественных бокситов, непосредственная переработка которых в настоящее время экономически неэффективна.

Характерное специфическое свойство бокситов — их высокая дисперсность, приближающаяся к дисперсности коллоидов. По внешнему виду бокситы часто похожи на глину, цвет их от светлого до темно-красного (чаще всего красный с различными оттенками). Плотность бокситов колеблется от 1.2 до 3.5 г/см³, твердость от 2 до 7 (по шкале Мооса). Основными показателями, характеризующими качество бокситов, являются содержания окиси алюминия и окиси кремния, а также их отношение по массе, называемое кремниевым модулем боксита μ_{Si} . К бокситам относят горные породы, кремниевый модуль которых больше 2. Чем выше кремниевый модуль, тем лучше качество боксита.

Обогащение алюминиевых руд пока не получило широкого распространения, так как бокситообразующие минералы имеют близкие значения плотности, дисперсный характер и тонкое взаимное прорастание. Разработка и усовершенствование способов обогащения и переработки бокситов и других алюминиевых руд продолжаются [21–23]. Одним из наиболее универсальных методов для многих разновидностей бокситов, является химическое обогащение с предварительным обжигом, позволяющее удалять из них до 70 % кремнезема [22].

Так как в ряде работ [24–29] установлена возможность усиления магнитных свойств различного минерального сырья радиационно-термической обработкой высокоэнергетическими электронами, то представляет интерес изучение такой обработки для модификации свойств железистых бокситов и совершенствования процессов их обогащения.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на примере пробы бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения Тиманского района (Республика Коми). Основные компоненты химического состава бокситов, масс. %: Al₂O₃ — 65.53; Fe₂O₃ — 24.34; SiO₂ — 4.93. Примесные компоненты, масс. %: TiO₂ — 2.50; MgO — 0.44; MnO — 1.11; Na₂O — 0.10; K₂O — 0.25; CaO — 0.32; P₂O₅ — 0.27; SO₃ — 0.05; Cr₂O₃ — 0.03; ZnO — 0.03; NiO — 0.02; PbO — 0.03; CuO — 0.01; SrO — 0.04; NbO — 0.01; ZrO₂ — 0.11; Y₂O₃ — 0.01; CeO₂ — 0.01. Среди примесных компонентов проба содержит редкоземельные и редкие элементы: иттрий (Y), церий (Ce), цирконий (Zr).

Радиационно-термическая обработка образцов бокситов осуществлялась пучком ускоренных электронов с энергией 2.4 МэВ на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН. Изменением параметров тока пучка, его частоты и времени обработки получены требуемые режимы радиационно-термической модификации материала. Температура и поглощенная доза определялись с помощью стандартных физических методов. Термическая обработка образцов боксита проводилась в муфельной печи типа МИМП 10П. Для измерения удельной магнитной восприимчивости исходных и обработанных образцов бокситов применялся измеритель магнитной восприимчивости ИМВ. Сухая магнитная сепарация исходных и обработанных бокситов выполнялась на сепараторе типа 138-СБэ. В ходе исследований использовались современные приборы и методы анализа исходной руды и продуктов ее обогащения — рентгено-флуоресцентный спектрометр ARL OPTIM'X, рентгеновский дифрактометр ДРОН-4 и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлена гранулометрическая характеристика рассмотренных бокситов. Анализ данных показывает, что в материале крупностью – 0.045 мм сосредоточено более 90% Al_2O_3 . Возрастает содержание Al_2O_3 с 65.53 до 66.56%, Fe_2O_3 снижается с 24.34 до 23.70% и SiO_2 с 4.93 до 4.66% и повышается кремниевый модуль боксита с 13.29 до 14.28 по сравнению с содержанием в исследованном продукте. Следовательно, может быть рекомендовано разделение исходных бокситов по крупности, которое позволит улучшить их качество.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав материала исходной бокситовой руды

Класс, мм	Выход, %	Содержание, %			$\mu_{\text{Si}} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	Распределение, %		
		Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3		Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
+0.071	2.86	53.84	7.53	30.38	7.15	2.35	4.37	3.57
–0.071	7.14	57.18	7.31	30.03	7.82	6.23	10.58	8.81
+0.045								
–0.045	90.00	66.56	4.66	23.70	14.28	91.42	85.05	87.62
Итого	100.00	65.53	4.93	24.34	13.29	100.00	100.00	100.00

В табл. 2 продемонстрированы результаты магнитной сепарации исходных бокситов. Показано, что увеличение напряженности магнитного поля (МП) от 155 до 796 кА/м приводит к повышению выхода магнитного продукта с 9.22 до 95.01%. Извлечение Al_2O_3 , SiO_2 и Fe_2O_3 в магнитный продукт также повышается: Al_2O_3 с 9.08 до 95.10%, SiO_2 с 9.07 до 95.20%, а Fe_2O_3 с 9.15 до 95.03%. При этом селективного разделения не обнаружено из-за тонкого прораствания минералов друг с другом.

ТАБЛИЦА 2. Результаты сухой магнитной сепарации исходной бокситовой руды

Напряженность МП, кА/м	Продукт	Выход %	Содержание, %			$\mu_{\text{Si}} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$	Извлечение, %		
			Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3		Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
155	Магнитный	9.22	64.53	4.85	24.15	13.31	9.08	9.07	9.15
	Немагнитный	90.78	66.68	4.94	24.36	13.50	90.92	90.93	90.85
	Исходный	100.00	65.53	4.93	24.34	13.29	100.00	100.00	100.00
322	Магнитный	16.98	68.03	5.05	25.36	13.47	17.63	17.44	17.70
	Немагнитный	83.02	65.01	4.89	24.12	13.29	82.37	82.56	82.30
	Исходный	100.00	65.52	4.92	24.33	13.32	100.00	100.00	100.00
478	Магнитный	68.76	66.34	5.09	25.24	13.03	69.60	71.03	71.30
	Немагнитный	31.24	63.78	4.57	22.36	13.96	30.40	28.97	28.70
	Исходный	100.00	65.54	4.93	24.34	13.29	100.00	100.00	100.00
639	Магнитный	88.78	65.93	4.96	24.52	13.29	89.35	89.18	89.40
	Немагнитный	11.22	62.18	4.76	23.00	13.06	10.65	10.82	10.60
	Исходный	100.00	65.51	4.94	24.35	13.26	100.00	100.00	100.00
796	Магнитный	95.01	65.59	4.94	24.35	13.28	95.10	95.20	95.03
	Немагнитный	4.99	64.35	4.74	24.24	13.58	4.90	4.80	4.97
	Исходный	100.00	65.53	4.93	24.34	13.29	100.00	100.00	100.00

С целью определения минерального состава исходной пробы бокситов выполнялся рентгенофазовый анализ (рис. 1). Съемка рентгенограмм проводилась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 в ИГМ СО РАН при стандартном режиме. В результате исследования установлены основные минералы, входящие в состав бокситов: бемит, гематит и гетит, в небольших количествах имеется рутил и анатаз. Бемит — минерал состава $\gamma\text{-AlOOH}$ (или $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) является пороодообразующим ряда месторождений России, таких как Тихвинское, Северо-Онежское и Тиманское. Гематит — $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, устойчивый оксид железа, характерный для бокситов осадочного происхождения. Гетит — $\alpha\text{-FeO(OH)}$ (или $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Рутил, анатаз — титансодержащие минералы бокситов.

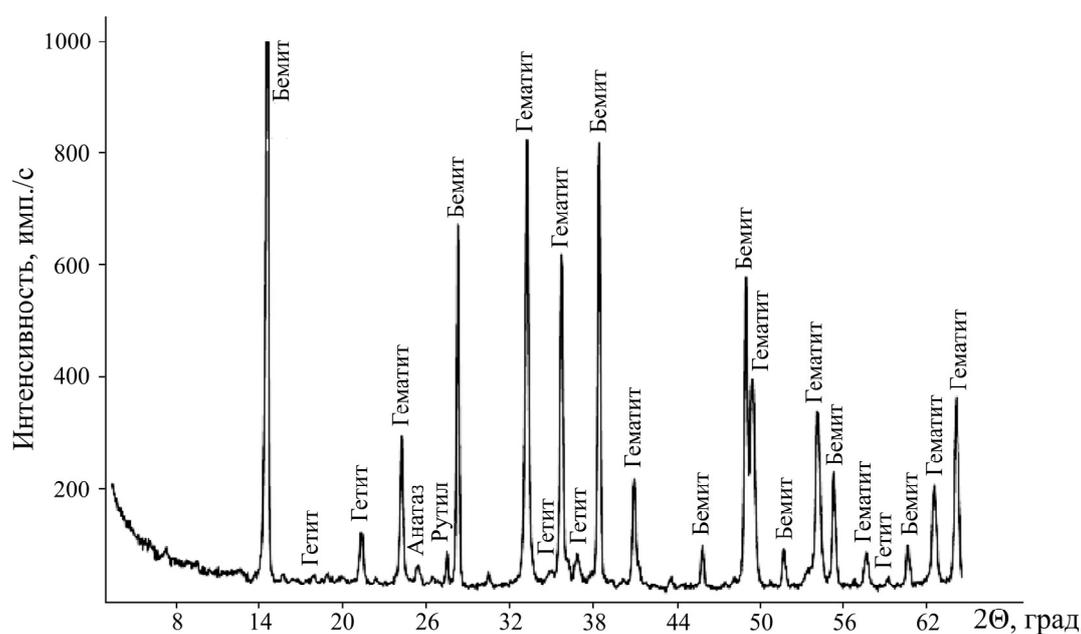


Рис. 1. Рентгенограмма пробы исходного боксита

Из полученных данных рентгенофазового анализа следует, что существенной помехой для процессов обогащения является наличие в исследуемой пробе железистых бокситов немагнитных железосодержащих оксидов — гетита и гематита. Если их преобразовать в магнитные минералы, то это обеспечит разделение и селективное извлечение алюминиевой и железистой компонент, что в свою очередь повысит качество алюминиевого концентрата и откроет перспективы получения дополнительного железосодержащего продукта. Такая возможность подтверждена трансформацией немагнитных оксидов и оксигидроксидов железа в магнетит с целью улучшения обогатимости собственно железных руд [25]. В настоящее время получены убедительные доказательства эффективности использования обработки железосодержащих немагнитных и слабомагнитных руд и минералов высокоэнергетическими ускоренными электронами для усиления магнитных свойств [6, 25, 28–29].

Учитывая установленный минеральный состав, можно предполагать, что радиационно-термическая обработка бокситовой руды позволит изменять ее технологические свойства. В табл. 3 приведены результаты исследований магнитных свойств бокситов при термической обработке.

ТАБЛИЦА 3. Влияние термической обработки на магнитную восприимчивость бокситов

Условия обработки		Магнитная восприимчивость	
Температура, °С	Время, мин	объемная, ед. СИ	удельная, см ³ /г
Бокситы без обработки		35.6·10 ⁻⁵	9.20·10 ⁻⁵
Обработка в муфельной печи МИМП 10П			
200	60	29.65·10 ⁻⁵	7.66·10 ⁻⁵
300	60	28.74·10 ⁻⁵	7.43·10 ⁻⁵
500	60	26.47·10 ⁻⁵	6.84·10 ⁻⁵
600	60	30.65·10 ⁻⁵	7.92·10 ⁻⁵
Обработка на ускорителе ИЛУ-6			
200	0	30.44·10 ⁻⁵	7.86·10 ⁻⁵
200	20	28.55·10 ⁻⁵	7.38·10 ⁻⁵
300	0	34.81·10 ⁻⁵	8.99·10 ⁻⁵
300	20	29.61·10 ⁻⁵	7.65·10 ⁻⁵
500	20	178.18·10 ⁻⁵	46.04·10 ⁻⁵
600	20	208.95·10 ⁻⁵	53.99·10 ⁻⁵

Экспериментальные данные табл. 3 свидетельствуют о том, что магнитная восприимчивость бокситов при термическом воздействии изменяется. После их термической обработки в муфельной печи она незначительно уменьшается, а в результате радиационно-термической обработки — существенно увеличивается. Влияние термической обработки бокситов на результаты магнитной сепарации показано в табл. 4 и 5.

ТАБЛИЦА 4. Влияние предварительной термической обработки бокситов в течение 60 мин в муфельной печи МИМП 10п на результаты последующей сухой магнитной сепарации

Напряженность МП, кА/м	Продукт	Выход, %	Содержание, %			$\mu_{Si} = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	Извлечение, %		
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
При температуре 200°С									
322	Магнитный	16.82	68.18	5.01	25.03	13.61	17.50	17.10	17.30
	Немагнитный	83.18	65.10	4.91	24.20	13.26	82.50	82.90	82.70
	Исходный	100.00	65.53	4.93	24.34	13.29	100.00	100.00	100.00
При температуре 300°С									
322	Магнитный	13.76	65.00	4.81	27.95	13.51	13.65	13.47	13.68
	Немагнитный	86.24	65.60	4.93	27.93	13.31	86.35	86.53	86.32
	Исходный	100.00	65.52	4.92	24.35	13.32	100.00	100.00	100.00
При температуре 500°С									
322	Магнитный	14.06	60.13	4.42	22.54	13.60	12.90	12.59	13.00
	Немагнитный	85.94	66.43	5.02	24.68	13.23	87.10	87.41	87.00
	Исходный	100.00	65.56	4.94	24.38	13.27	100.00	100.00	100.00
При температуре 600°С									
322	Магнитный	3.05	63.41	4.64	21.25	13.67	2.95	2.85	2.65
	Немагнитный	96.95	65.63	4.97	24.56	13.21	97.05	97.15	97.35
	Исходный	100.00	65.56	4.96	24.46	13.22	100.00	100.00	100.00

ТАБЛИЦА 5. Влияние предварительной радиационно-термической обработки бокситов со скоростью 25 °С/мин на ускорителе ИЛУ-6 на результаты последующей сухой магнитной сепарации

Напряженность МП, кА/м	Продукт	Выход, %	Содержание, %			$\mu_{Si} = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	Извлечение, %		
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
Нагрев до температуры 200 °С и выдержка 20 мин									
322	Магнитный	17.15	65.53	4.91	21.43	13.35	17.15	17.09	15.10
	Немагнитный	82.85	65.53	4.93	24.93	13.29	82.85	82.91	84.90
	Исходный	100.00	65.53	4.93	24.34	13.29	100.00	100.00	100.00
Нагрев до температуры 500 °С и выдержка 20 мин									
322	Магнитный	25.36	60.22	4.52	22.51	13.32	23.30	23.17	23.40
	Немагнитный	74.64	67.35	5.08	25.04	13.26	76.70	76.83	76.60
	Исходный	100.00	65.54	4.94	24.40	13.27	100.00	100.00	100.00
Нагрев до температуры 600 °С и выдержка 20 мин									
322	Магнитный	80.75	65.59	4.96	25.41	13.22	80.76	80.78	80.90
	Немагнитный	19.25	65.54	4.95	25.16	13.24	19.24	19.22	19.10
	Исходный	100.00	65.58	4.96	25.36	13.22	100.00	100.00	100.00

Как следует из данных табл. 4, выход магнитной фракции сухой магнитной сепарации обработанных в муфельной печи при различной температуре бокситов уменьшается, что соответствует данным табл. 3. Снижение удельной магнитной восприимчивости обработанных бокситов приводит к уменьшению выхода магнитной фракции.

Радиационно-термическая обработка бокситов до температуры 600 °С ускоренными электронами (табл. 5) в отличие от термической обработки при тех же условиях повышает выход магнитной фракции при напряженности магнитного поля 322 кА/м с 3.05 до 80.75 %. Из анализа экспериментальных данных следует, что повышение температуры от 200 до 600 °С позволяет увеличить выход магнитной фракции с 17.15 до 80.75 % при одновременном повышении извлечения в магнитную фракцию: Al₂O₃ с 17.15 до 80.76 %, SiO₂ с 17.09 до 80.78 %, Fe₂O₃ с 15.10 до 80.90 %.

С целью объяснения полученных результатов выполнены исследования минерального состава термически обработанных проб бокситов с помощью рентгенофазового анализа. Рентгенограммы проб бокситов приведены на рис. 2. Отметим, что термообработка приводит к существенным изменениям минерального состава бокситов. Если в исходном боксите присутствуют бемит, гематит и гетит, то в термически обработанных пробах зафиксировано наличие только гематита и в небольших количествах бемита, рутила и анатаза. Особенность термообработанных образцов боксита — образование γ -Al₂O₃ (кубического) и уменьшение количества гидратированных соединений алюминия и железа. Важное отличие радиационно-термической обработки железистых бокситов на ускорителе ИЛУ-6 от термической обработки в муфельной печи — образование ферромагнитных фаз маггемита γ -Fe₂O₃ и магнетита Fe₃O₄ (рис. 2б).

Появление этих составляющих, обладающих магнитными свойствами, объясняет резкое повышение магнитной восприимчивости материала бокситов при температуре 500 °С и более в результате обработки ускоренными электронами (табл. 3). Если объемная магнитная восприимчи-

вость материала пробы исходных бокситов составляла $35.6 \cdot 10^{-5}$ единиц СИ, то после обработки в течение 20 мин при температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$ повысилась до $178.18 \cdot 10^{-5}$, а после обработки при температуре $600 \text{ }^\circ\text{C}$ составила $208.95 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

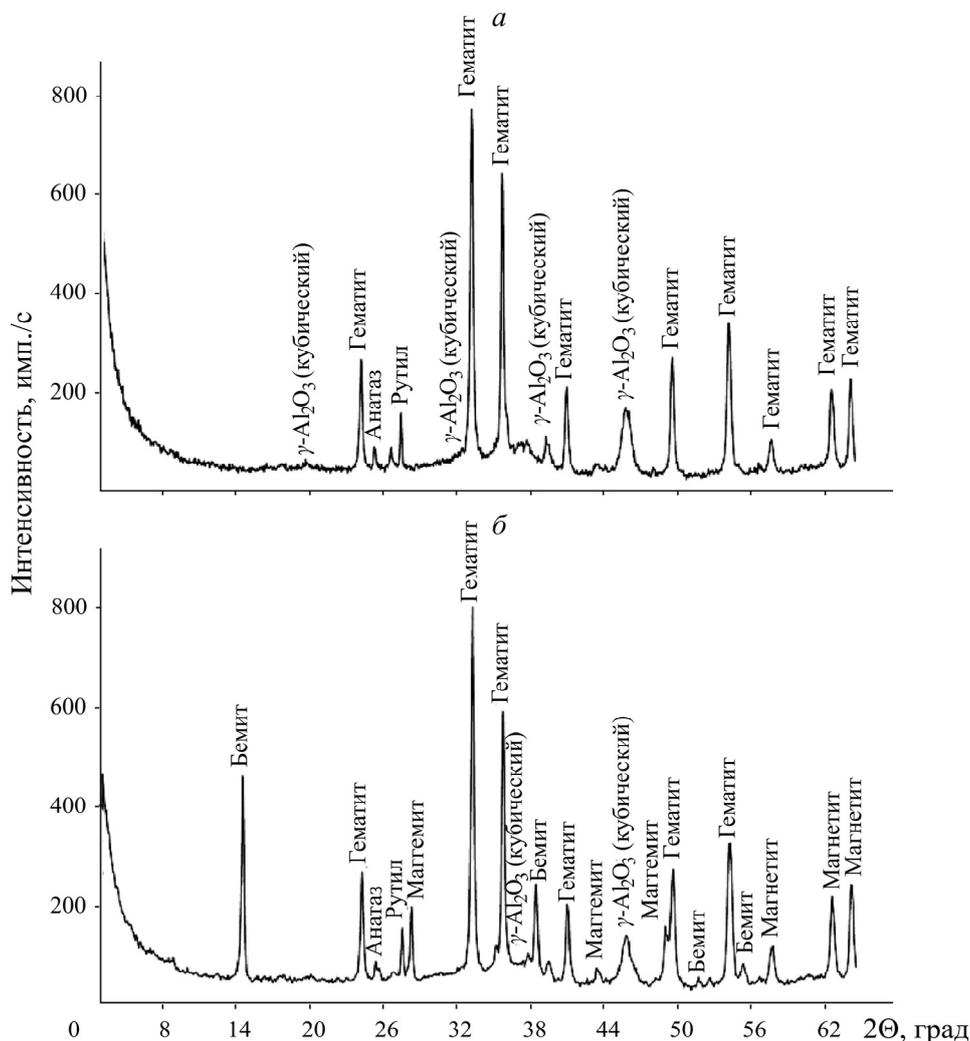


Рис. 2. Рентгенограммы боксита, обработанного в муфельной печи (а) и на ускорителе (б) при $600 \text{ }^\circ\text{C}$

Распределение основных редких и редкоземельных элементов по продуктам обогащения бокситов магнитным способом показывает, что их извлечение в магнитную фракцию в случае использования радиационно-термической обработки повышается (табл. 6). При этом по сравнению с исходным материалом их выделение в магнитную фракцию можно осуществить при более низких напряженностях магнитного поля.

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования особенностей минерального состава железосодержащих бокситов показали, что термическая обработка позволяет изменять их свойства и определять технологические режимы обогащения и переработки с комплексным их использованием. Важное условие достижения высоких технологических показателей обогащения железосодержащих бокситов — их селективная дезинтеграция и проверка степени раскрытия минерального сырья перед обогащением.

ТАБЛИЦА 6. Влияние видов термической обработки бокситов на извлечение редких и редкоземельных элементов при сухой магнитной сепарации

Условия обработки	Напряженность МП, кА/м	Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
				SrO	CeO ₂	Y ₂ O ₃	SrO	CeO ₂	Y ₂ O ₃
Без обработки	320	Магнитный	17.60	0.0410	0.0061	0.0103	17.96	10.77	18.03
		Немагнитный	82.40	0.0400	0.0108	0.0100	82.04	89.23	81.97
		Итого	100.00	0.0400	0.0100	0.0100	100.00	100.00	100.00
Обработка в печи при 600°C	320	Магнитный	2.68	0.0373	0.0100	0.0135	2.49	2.68	3.62
		Немагнитный	97.32	0.0402	0.0100	0.0099	97.51	97.32	96.38
		Итого	100.00	0.0400	0.0100	0.0100	100.00	100.00	100.00
Обработка на ИЛУ-6 при 600°C	320	Магнитный	78.65	0.0414	0.0105	0.0100	81.38	82.51	78.65
		Немагнитный	21.35	0.0349	0.0082	0.0100	18.62	17.49	21.35
		Итого	100.00	0.0400	0.0100	0.0100	100.00	100.00	100.00
Без обработки	480	Магнитный	65.50	0.0406	0.0098	0.0103	68.06	64.37	67.53
		Немагнитный	34.50	0.0389	0.0103	0.0094	31.94	35.63	32.47
		Итого	100.00	0.0400	0.0100	0.0100	100.00	100.00	100.00
Обработка на ИЛУ-6 при 600°C	480	Магнитный	92.41	0.0405	0.0099	0.0099	93.48	91.50	91.64
		Немагнитный	7.59	0.0344	0.0112	0.0110	6.52	8.50	8.36
		Итого	100.00	0.0400	0.0100	0.0100	100.00	100.00	100.00

ВЫВОДЫ

Выполненные комплексные экспериментальные исследования показали, что свойства железистых бокситов с увеличением температуры изменяются. Нагрев в муфельной печи в диапазоне температур 200–600°C приводит к уменьшению их магнитной восприимчивости, а радиационно-термическая модификация ускоренными электронами при тех же температурах к усилению их магнитных свойств. Термообработка вызывает существенные изменения минерального состава бокситов. Если в исходном боксите присутствуют бемит, гематит и гетит, то в термически обработанных пробах зафиксировано наличие только гематита и в небольших количествах бемита, рутила и анатаза. Особенностью термообработанных образцов боксита является образование γ -Al₂O₃ (кубического), уменьшение количества карбонатов и гидратированных соединений алюминия и железа.

В результате радиационно-термической модификации под действием ускоренных электронов в железистых бокситах образуются ферромагнитные фазы, что может существенно улучшить магнитное разделение алюминиевых и железосодержащих минералов, а также решить задачу извлечения редких и редкоземельных элементов. Тесное взаимное прорастание алюминий- и железосодержащих минералов друг с другом и с минералами пустой породы не позволяет получить методом сухой магнитной сепарации из железистых бокситов отдельные алюминиевый и железосодержащий концентраты. Более тонкое измельчение и применение магнитных сепараторов специальных конструкций обеспечит селективное разделение бокситов с получением отдельных концентратов.

Установленная возможность радиационно-термической модификации свойств бокситов может быть использована с целью совершенствования их переработки и минимизации потерь полезных компонентов при обогащении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Государственный доклад** о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 г. — М., 2021. — 572 с.
2. **Чантурия В. А., Шадрунова И. В.** Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // *Материалы Междунар. конф. “Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья” (Плаксинские чтения)*. — Владикавказ. — 2021. — С. 3–8.
3. **Решение Международной конференции** “Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения” (Плаксинские чтения). — Владивосток, 2022. — С. 1–6.
4. **Чантурия В. А., Козлов А. П.** Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // *Материалы Междунар. науч. конф. (Плаксинские чтения)*. — Красноярск, 2017. — С. 3–6.
5. **Чантурия В. А., Вайсберг Л. А., Козлов А. П.** Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // *Обогащение руд*. — 2014. — № 2. — С. 3–9.
6. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Коваленко К. А.** Развитие экологически безопасных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // *Горн. журн.* — 2020. — № 5. — С. 39–46.
7. **O'Connor C. T.** Review of important developments since the 1st IMPC in 1952 in the understanding of the effects of chemical factors on flotation, XXX Int. Miner. Proc. Congr. IMPC, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 1–26.
8. **Y. Saavedra Moreno, Boumival G., and Ata S.** Comparing the froth stability of two-phase and three-phase systems for various frother types, XXX Int. Miner. Proc. Congr. IMPC, Cape Town, South Africa, 2020 — P. 1021–1035.
9. **Wang G., Wen D., and Chen X.** A comparison study of collisions of bidisperse inertial particles in a homogeneous isotropic turbulence, XXX Int. Miner. Proc. Congr. IMPC, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 1036–1045.
10. **Ignatkina V. A., Shepeta E. D., Samatova L. A., Lygach A. V., and Aksenova D. D.** Increasing the contrast of flotation of finely disseminated calcium-bearing ores by using of combination low polar compounds and fatty acid collector, XXX Int. Miner. Proc. Congr. IMPC, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 1057–1068.
11. **Lieberwirth H. and Ktihnel L.** Influence of particle size on selectivity in confined bed comminution, XXX Int. Miner. Proc. Congr. IMPC, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 365–376.
12. **Moodley T. and Govender I.** Experimental validation of DEM in rotating drums using Positron Emission Particle Tracking, XXX Int. Miner. Proc. Congr. IMPC, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 413–427.
13. **Oladele T. P., Bbosa L. B., and Weatherley D. K.** Numerical investigation on the effect of pre-existing cracks during impact breakage in a short impact load cell device, XXX Int. Miner. Proc. Congr. IMPC, Cape Town, South Africa, 2020. — P. 494–501.
14. **Ростовцев В. И., Кондратьев С. А.** Совершенствование переработки техногенного свинцово-цинкового минерального сырья // XVIII Междунар. науч. конгр. “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология”. — Новосибирск: СГУГиТ, 2022. — № 3 — С. 286–294.
15. **Ростовцев В. И., Кондратьев С. А.** Особенности и специфика рудоподготовки и переработки техногенного минерального сырья // *Материалы междунар. конф. “Современные проблемы комплекс-*

- ной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения” (Плаксинские чтения). — Владивосток, 2022. — С. 162–165.
16. **Брызгин А. А., Коробейников М. В., Кондратьев С. А., Ростовцев В. И.** Эффекты дальнего действия при взаимодействии электронного пучка с кристаллическими веществами // Тр. XXIX Междунар. конф. “Радиационная физика твердого тела”. — Севастополь, 2019. — С. 55–64.
 17. **Ростовцев В. И., Брызгин А. А., Коробейников М. В.** Повышение селективности измельчения и комплексности использования минерального сырья на основе радиационной модификации его свойств // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 136–146.
 18. **Ростовцев В. И.** Пути повышения извлечения микро- и наночастиц ценных компонентов из природного и техногенного минерального сырья // ФТПРПИ. — 2021. — № 4. — С. 131–141.
 19. **Ростовцев В. И., Брызгин А. А., Коробейников М. В.** Улучшение процесса селективной дезинтеграции труднообогатимой руды Рубцовского месторождения после радиационной обработки / Материалы междунар. конф. “Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья” (Плаксинские чтения), Владикавказ, 2021. — С. 166–169.
 20. **Вахрушев А. В., Котова О. Б.** Алюминиевое сырьё, новые методы и подходы глубокой и комплексной переработки // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. — Петрозаводск, 2010. — 192 с.
 21. **Дубовиков О. А., Бричкин В. Н., Николаева Н. В., Ромашев А. О.** Исследование процесса термохимического обогащения бокситов Среднего Тимана // Обогащение руд. — 2014. — № 4. — С. 136–146.
 22. **Дубовиков О. А.** Термохимическое кондиционирование состава низкокачественных бокситов и их переработка щелочными способами. — СПб., 2012. — 319 с.
 23. **Алексеева Е. А.** Получение малокремнистого алюминиевого сырья в процессе рудоподготовки низкокачественных бокситов: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. — СПб, 2015. — 183 с.
 24. **Florek I. et al.** Intensification of the magnetic separation of fine chalcopyrite ores by means of irradiation by electrons, Proc. 1st Int. Conf. Mod. Process Mineral. Miner. Process., Beijing, China, 1992.
 25. **Bochkarev G. R., Chanturiya V. A., Vigdergauz V. E., Lunin V. D et al.** Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing, Proc. XX Int. Miner. Process. Congr., Aachen, Germany, 1997, Vol. 1. — P. 231–243.
 26. **Yean S., Cong L., Yavuz C. T., Mayo J. T., Yu W. W., Kan A. T., Colvin V. L., and Tomson M. B.** Effect of magnetite particle size on adsorption and desorption of arsenite and arsenate, J. Mater. Res., 2005, Vol. 20, No. 12. — P. 3255–3264.
 27. **Zborowski M. and Chalmers J. J.** Magnetic cell separation, Oxford, 2008, Vol. 36. — 473 p.
 28. **Ванг Х., Бочкарев Г. Р., Ростовцев В. И., Вейгельт Ю. П., Лу С. С.** Повышение магнитных свойств железосодержащих минералов при радиационно-термической обработке // ФТПРПИ. — 2004. — № 4. — С. 89–97.
 29. **Ростовцев В. И.** Радиационно-термический метод изменения магнитных свойств минералов в обогащении минерального сырья // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. конф. “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология” — Новосибирск, 2015. — Т. 3. — С. 206–210.

Поступила в редакцию 15/XII 2022

После доработки 14/I 2023

Принята к публикации 19/I 2023