

УДК 622.7

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И РЕКОМЕНДАЦИЙ
ПО ПЕРЕРАБОТКЕ БОКСИТОВ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЖЕЛЕЗА
И ТОНКИХ ЧАСТИЦ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ**

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 и радиационно-термической обработки ожелезненных бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения и установлены различные механизмы минеральных превращений. Если при термической обработке оксигидроксиды переходят в безводные оксиды алюминия и железа, то за счет радиационно-термической модификации из рассеянных микроэлементов образуются металлические сплавы и новые минералы в виде крупных индивидов. Железистые бокситы рекомендуется перерабатывать на основе достижений фундаментальных наук, в первую очередь наноминералогии, и выявленного эффекта фазовой гетерогенизации. Это позволит повысить извлечение из некондиционных бокситов и красных шламов тонких частиц не только алюминия, но и других ценных компонентов экологически безопасными способами.

Ожелезненные бокситы, совершенствование методов переработки, термическая обработка, обработка ускоренными электронами, магнитная восприимчивость, сухая магнитная сепарация, фазовая гетерогенизация, извлечение редких и редкоземельных элементов и тонких частиц ценных компонентов

DOI: 10.15372/FTPRPI20230612

Важную роль в экономическом развитии России играет алюминиевая промышленность. На данный момент эта отрасль цветной металлургии переживает свои лучшие времена и становится одной из наиболее прибыльных. В этой сфере деятельности, представленной практически во всех регионах РФ, работают сотни предприятий, дающие возможность трудиться миллионам граждан.

Непосредственно алюминий получают из глинозема. Это сырье представляет собой оксид алюминия Al_2O_3 , извлекаемый из бокситов, алунитов и нефелиновых сиенитов. Бокситы — наиболее распространенный исходный материал для производства алюминия, считающийся основной алюминиевой рудой. В природе в чистом виде алюминия практически нет, поэтому добывают его из алюминиевых руд. В земной коре их содержится около 9 %. В настоящее время насчитывается порядка 250 разновидностей минеральных соединений, включающих алюминий, но не все из них пригодны для переработки.

Бокситы чаще используются как сырье для добычи металла, так как содержат до 60 % оксидов алюминия. В их состав входят оксиды кремния и железа, кварц, магний, натрий и другие химические элементы и соединения. В зависимости от состава бокситы имеют разную плотность. Для производства 1 т алюминия необходимо 4.5 т боксита. В соответствии со стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 г., утвержденной распоряжением Правительства РФ [1], бокситы относятся к третьей группе дефицитных полезных ископаемых, внутреннее потребление которых в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом. Они входят в перечни основных стратегических видов минерального сырья [2, 3].

Согласно [4], Россия располагает крупной сырьевой базой бокситов, но тем не менее испытывает дефицит качественных бокситов металлургического сорта для производства глинозема, т. е. промежуточного продукта, используемого в производстве алюминия. Бокситы российских месторождений по минеральному составу в основном бемитовые и диаспор-бемитовые, в отличие от гиббситовых в зарубежных месторождениях, поэтому они не могут перерабатываться в глинозем низкотемпературным (100 °С) способом Байера, так как диаспор-бемитовые бокситы выщелачиваются только при 240 °С. Кроме того, из-за совместного нахождения в пределах месторождений высококачественных и низкокачественных бокситов наиболее рациональна их переработка комбинированным способом с использованием высокотемпературного способа Байера и способа спекания.

Крупнейшими запасами бокситов обладает Северо-Западный Федеральный округ (44 % балансовых). На бокситы металлургического сорта, разведанные в Средне-Тиманском бокситорудном районе Республики Коми, приходится 15 % запасов. Бокситы полигенного и латеритного типов содержатся в разрабатываемых Вежаю-Ворыквинском и Верхне-Щугорском месторождениях и подготавливаемом к освоению Восточном. По минеральному составу они гематит-бемитовые и гематит-шамозит-бемитовые среднего качества. Попутные компоненты в образцах исследованных бокситов: галлий, ванадий и другие ценные компоненты, не извлекаемые в самостоятельную продукцию при переработке. Извлечение промышленно ценных микроэлементов из бокситов и красных шламов, в которых после байеровского процесса содержится 60–100 % лантаноидов, является актуальной задачей, которая решается способами селективного выщелачивания с использованием сильных кислот, щелочно-алюминатных растворов, трифторметилсульфонила и других реагентов [5–9]. Максимальный результат такого выщелачивания — извлечение 45–50 % скандия и 70–85 % редких и редкоземельных металлов.

Усложняют переработку Вежаю-Ворыквинских бокситов примеси каолинита, минералов кремнезема (кварц, опал), карбонатов, фосфатов, оксидов титана (рутил, анатаз, титанит), сульфидов, соединений хрома, ванадия, редких земель, галлия, циркония, ниобия, золота, теллура [10–13]. Согласно [14], эффективность функционирования минерально-сырьевого комплекса России определяется уровнем развития технологий добычи и обогащения полезных ископаемых. При первичной переработке 35–40 % потерь ценных компонентов связано со сrostками и 30–35 % — с тонкими частицами < 10 мкм. Вероятность открытия новых крупных и богатых месторождений невелика. Расширение минерально-сырьевой базы России возможно за счет вовлечения в разработку труднообогатимых руд и нетрадиционного минерального сырья, в том числе техногенного. Труднообогатимые руды характеризуются сложным вещественным составом, низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью вплоть до эмульсионной и близкими физико-химическими и технологическими свойствами. Их использование возможно на основе создания инновационных процессов комплексной и глубокой переработки с учетом последних достижений фундаментальных наук и комбинирования процессов обогащения с пиро- и гидрометаллургическими.

Цель настоящей работы — разработка рациональных эффективных технологических схем и рекомендаций по совершенствованию методов переработки бокситов с повышенным содержанием железа и тонких частиц ценных компонентов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на примере ожелезненных бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения Тиманского района (Республика Коми). Средний химический состав бокситов представлен основными и примесными компонентами. Основные, мас. %: Al_2O_3 — 62.40; Fe_2O_3 — 28.02; SiO_2 — 4.20; TiO_2 — 2.33; примесные: MgO — 1.08; MnO — 0.96; K_2O — 0.18; CaO — 0.18; P_2O_5 — 0.12; PbO — 0.03; ZnO — 0.03; SrO — 0.04; CeO_2 — 0.03; Cr_2O_3 — 0.02; Sc_2O_3 — 0.01; ZrO_2 — 0.11; Y_2O_3 — 0.01; La_2O_3 — 0.01; Nb_2O_5 — 0.01. Литохимические модули (кремниевый K , гидролизатный G , железистый J) исследуемой пробы рассчитывались по данным химического состава по формулам [15]:

$$K = \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = 62.40 : 4.20 = 14.86;$$

$$G = (\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}) : \text{SiO}_2 = (2.33 + 62.40 + 28.02 + 0) : 4.20 = 22.03;$$

$$J = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}) : (\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) = (28.02 + 0 + 0.96) : (2.33 + 62.40) = 28.98 : 64.73 = 0.448.$$

Термическая обработка образцов боксита проводилась в муфельной печи типа МИМП 10П. Измерения удельной магнитной восприимчивости образцов бокситов осуществлялись измерителем магнитной восприимчивости типа ИМВ. Сухая магнитная сепарация исходных и обработанных бокситов выполнялась на сепараторе типа 138-СБэ с напряженностью магнитного поля до $796 \cdot 10^5$ А/м. В исследованиях использовались рентгено-флуоресцентный спектрометр ARL OPTIM'X, рентгеновский дифрактометр ДРОН-4, прибор для синхронного термического анализа STA 449 F1 Jupiter, сопряженный с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aeolos, NETZSCH GmbH (Германия) и др. 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 стандартными физическими методами. Фазовый состав исследованных бокситов определялся термическим, рентгеноструктурным и ИК-спектроскопическим методами [16, 17]. На ИК-спектрах исходных бокситов наблюдались полосы поглощения бемита и групп OH^- (рис. 1).

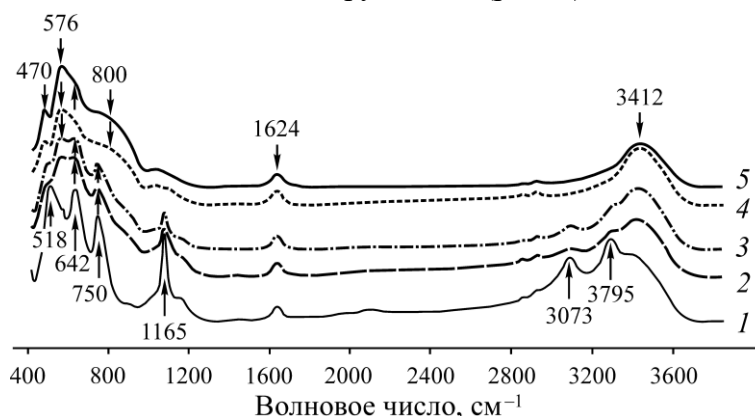


Рис. 1. Спектры ИК-поглощения, полученные для исходных железистых бокситов (1) и бокситов, подвергнутых радиационно-термической (2, 3) и термической (4, 5) обработке. Полосы поглощения, см^{-1} : 518, 642, 750, 1165 — бемит $\nu\text{AlO}(\text{OH})$; 470, 576 — фазы Al_2O_3 и Fe_2O_3 ; 1624 — $\delta\text{H}_2\text{O}$ в гидрогетите; 3073, 3795 — группы OH^-

Согласно полученным мессбауэровским спектрам, железистые оксиды в исследуемых бокситах включают, %: гематит — 50; “дефектный” гематит (маггемит) — 16; гетит и гидрогетит — 17; микро- и наноразмерные фазы с парамагнитными и супермагнитными свойствами — 17. При магнитной сепарации такой боксит разделяется на магнитную (15–20 %) и немагнитную (80–85 %) фракции.

На рис. 2 приведена рентгенограмма исходного образца исследованного боксита [18]. Основные минеральные компоненты исходных бокситов представлены бемитом, гетитом и гематитом, примесные — рутилом и анатазом.

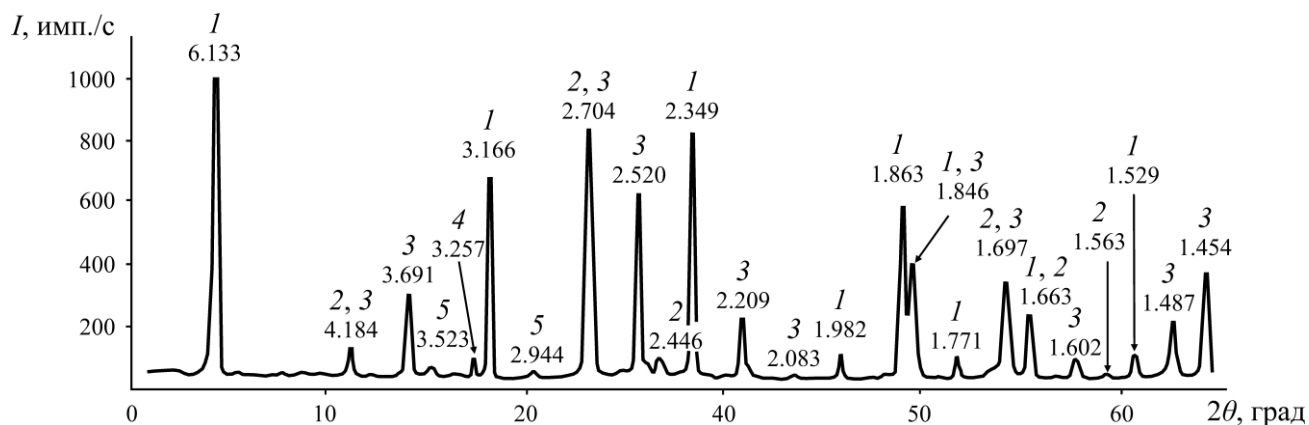


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма исходного образца боксита: 1 — бемит; 2 — гетит; 3 — гематит; 4 — рутил; 5 — анатаз

Исследования с использованием термического анализа свидетельствуют о гетит-бемитовом составе исходных бокситов (рис. 3). На кривой нагревания наблюдаются два эндоэффекта с экстремумами (минимумами) при температурах 300 и 520 °С, первый из них отвечает термодиссоциации гетита, второй — термодиссоциации бемита [18]. С этими термическими эффектами коррелируют два этапа потери массы и максимумы ионного тока воды и углекислого газа, образующегося при диссоциации карбонатных примесей.

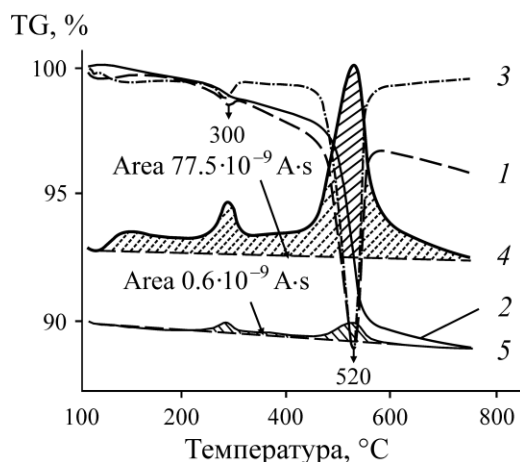


Рис. 3. Результаты термического анализа образца исходного боксита: 1 — нагревание; 2 — изменение массы; 3 — скорость изменения массы; 4, 5 — ионный ток воды и углекислого газа

Бокситы характеризуются бобовой текстурой, обусловленной сочетанием порфировых вкрапленников неправильной формы с размерами в плоскости $(49 \pm 38) \times (27 \pm 22)$ мкм и глинистой структурой связующей массы с алевропелитовым размером частиц (рис. 4). Порфировые вкрапленники сложены, %: гетитом и алюмогетитом (31); бемитом и феррибемитом (31); гематитом (30); рутилом (8). Связующая масса имеет преимущественно бемитовый состав. В Вежаю-Ворыквинском месторождении представлены четыре типа бокситов: гематит-бемитовый; гематит-шамозит-бемитовый; шамозит-бемитовый; каолинит-бемитовый [19]. Тонкодисперсная составляющая исследуемых бокситов сформирована преимущественно частицами размером 20–40 нм и менее (рис. 4).

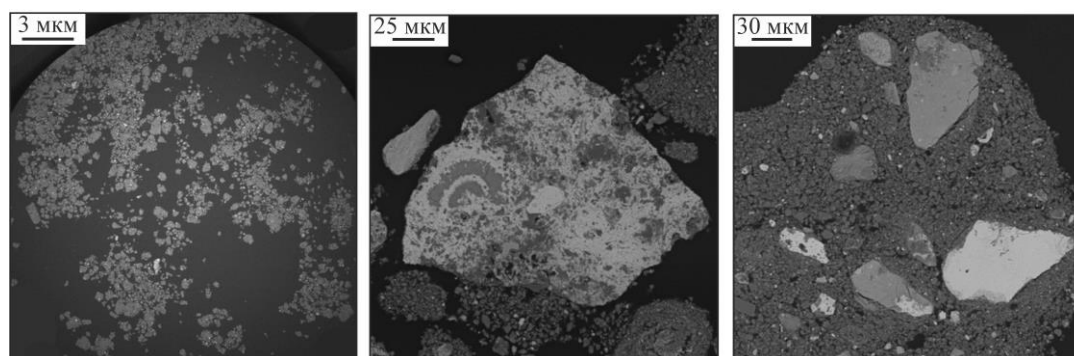


Рис. 4. Микростроение исходных железистых бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения. СЭМ-изображения в режиме упруго отраженных электронов

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ БОКСИТОВ

Радиационно-термическое модифицирование относится к способам немеханического энергетического воздействия на исходное минеральное сырье. Такое воздействие предназначено для повышения эффективности рудоподготовки и обогащения [20–24]. Эксперименты показали, что последствия радиационно-термических воздействий на железистые бокситы простираются гораздо дальше, чем разупрочнение и дезинтеграция руд, увеличение степени их измельчения, изменение магнитных свойств. Они проводились в два этапа: нагревание до разных температур и нагревание в сочетании с облучением. Образцы нагревались в муфельной печи МИМП-10П, радиационная обработка выполнялась пучками ускоренных электронов с энергией 2.4 МэВ на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН [20, 24].

Нагревание исходных железистых бокситов при 500 и 600 °С в течение 60 мин привело к полной дегидратации оксигидроксидов алюминия и железа и образованию за их счет шпинелида с дефектной структурой и маггемита при незначительном изменении структуры и магнитных свойств породы. На ИК-спектрах, полученных от термически обработанных образцов, преобладают полосы поглощения на фазах Al_2O_3 и Fe_2O_3 (см. рис. 1). Полоса поглощения на группах OH^- на бемите сильно размытая, сдвинутая в коротковолновую область, уширенная и бесструктурная. Объемная магнитная восприимчивость бокситов практически не изменялась ($25-30 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). Содержание магнитной фракции в отожженных образцах по мере нагревания до 500 °С медленно сокращалось с 18.0 до 12.5 %, а при нагревании до 600 °С скачкообразно упало до 3.0 %. Валовый химический состав термически обработанных образцов не изменился, прирост микроэлементов заметно увеличился и составил для химических элементов, %: Cu — 70–250; Zn —

20–25; Cd — 20–380; Zr — 2–20; Nb — 15–20; Sc — 25–40; Y — 35–70; Ce — 25–360; Nd — 1–10. Это обусловлено значительной дегидратацией исследуемых бокситов при нагревании. Превращения бемита при нагревании происходят ступенчато в следующей последовательности: $\text{AlO}(\text{OH}) \rightarrow \gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ (500–700 °C) $\rightarrow \delta\text{Al}_2\text{O}_3$ (700–900 °C) $\rightarrow \theta\text{Al}_2\text{O}_3$ (900–1000 °C) $\rightarrow \alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ (> 1000 °C) [25].

Обнаружение в продуктах нагревания бемитового боксита при 600 °C именно гамма-модификации Al_2O_3 вполне закономерно. Следует добавить, что фаза $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ (известная только как синтетическая) обнаружена в продуктах современного вулканизма и зарегистрирована как новый минерал дельталюминит, обладающий искаженной структурой шпинелида [26].

Радиационно-термическое преобразование железистых бокситов осуществлялось в ходе нагревания до 500 и 600 °C и выдержки при этих температурах в течение 20 мин при одновременной обработке ускоренными электронами. Микроструктура, химический и микроэлементный состав обработанных образцов не претерпевали заметных изменений в сравнении с продуктами только нагревания, а минеральный состав и магнитные свойства, напротив, существенно изменились. В качестве основных минералов в продуктах радиационно-термической обработки рентгенодифрактометрическим методом диагностированы гематит, шпинелид, магнетит, маггемит, рутил, анатаз и реликтовый бемит. На ИК-спектрах наблюдается уширенная, но отчетливая линия поглощения бемита, линии поглощения фаз Al_2O_3 и Fe_2O_3 и полоса поглощения групп OH^- , сдвинутая в коротковолновую область, с признаками структурности. Присутствие в радиационно-термически модифицированных бокситах реликтового бемита можно объяснить менее длительной выдержкой в ходе нагревания, чем в эксперименте с нагреванием без облучения.

Структура рассматриваемых образцов, т. е. сочетание порфировых вкрапленников и связующей алевропелитовой массы (рис. 5), сохранилась, а размер и форма вкрапленников изменились, став в 2 раза крупнее $(79 \pm 63) \times (35 \pm 28)$ мкм и более вытянутыми с коэффициентом удлинения 2.45 ± 0.84 . По минеральному составу частицы представлены гематитом, маггемитом и магнетитом на 48 %, корундом и феррикорундом на 47 %, а также рутилом и анатазом на 5 %.

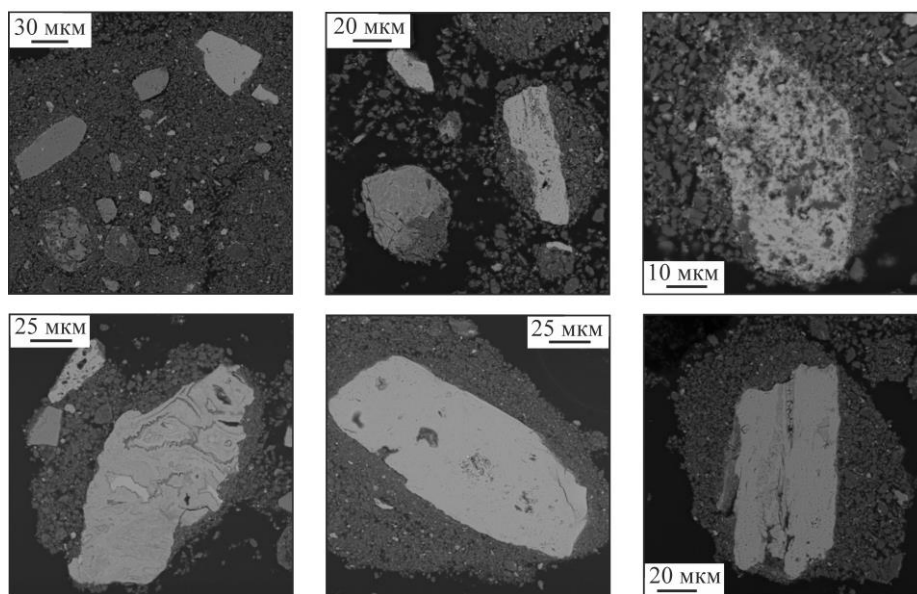


Рис. 5. Микростроение радиационно-термически модифицированных железистых бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения. СЭМ-изображения в режиме упруго отраженных электронов

Появление в составе радиационно-термических преобразованных бокситов сильно магнитных минералов привело к радикальной магнитной перестройке руд. В интервале нагревания до 500 °С в составе бокситов резко преобладала немагнитная фракция, при нагревании до 600 °С доля немагнитной фракции скачкообразно сократилась до ~20 %, а доля магнитной фракции увеличилась до ~80 %. Это изменение коррелирует с появлением в радиационно-термически преобразованных бокситах сначала маггемита, а после магнетита. Картина магнитной перестройки модифицированных бокситов разительно отличается от картины только термических превращений, при которых доля магнитной фракции не возрастает, а сокращается (рис. 6).

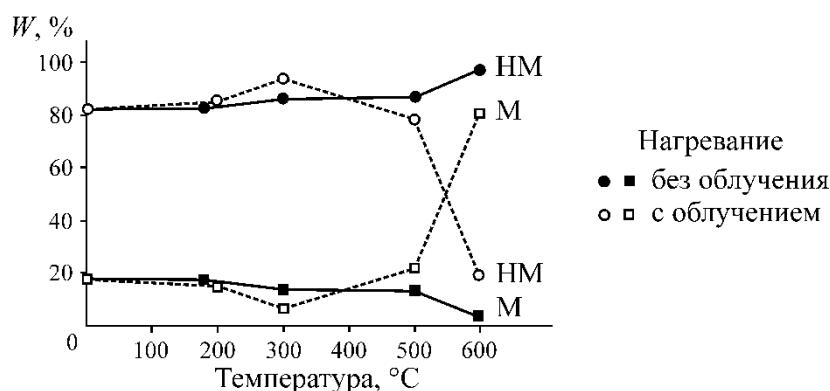


Рис. 6. Изменение выхода W немагнитной (НМ) и магнитной (М) фракций для термически и радиационно-термически преобразованных бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения

В табл. 1 приведены результаты сухой магнитной сепарации исходных бокситов. Увеличение напряженности магнитного поля от 155 до 796 кА/м приводит к повышению выхода магнитного продукта с 9.01 до 94.55 %. Извлечение Al_2O_3 , SiO_2 и Fe_2O_3 в магнитный продукт также повышается: Al_2O_3 с 9.36 до 95.06 %; SiO_2 с 9.30 до 93.75 %; Fe_2O_3 с 9.65 до 94.85 %. При этом селективного разделения не обнаружено из-за тонкого прораствания минералов друг с другом.

ТАБЛИЦА 1. Результаты сухой магнитной сепарации исходных бокситов, %

Напряженность магнитного поля, кА/м	Продукт	Выход	Содержание			Извлечение		
			Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
155	Магнитный	9.01	64.82	4.34	30.01	9.36	9.30	9.65
	Немагнитный	90.99	62.16	4.19	27.82	90.64	90.70	90.35
	Исходный	100.00	62.40	4.20	28.02	100.00	100.00	100.00
322	Магнитный	16.50	66.38	4.31	28.94	17.55	16.96	17.05
	Немагнитный	83.50	61.63	4.17	27.83	82.45	83.04	82.95
	Исходный	100.00	62.41	4.19	28.01	100.00	100.00	100.00
478	Магнитный	67.95	62.46	4.33	28.85	68.03	69.86	69.95
	Немагнитный	32.05	62.23	3.96	26.28	31.97	30.14	30.05
	Исходный	100.00	62.39	4.21	28.03	100.00	100.00	100.00
639	Магнитный	87.63	63.79	4.29	28.64	89.55	89.15	89.50
	Немагнитный	12.37	52.73	3.70	23.80	10.45	10.85	10.50
	Исходный	100.00	62.42	4.22	28.04	100.00	100.00	100.00
796	Магнитный	94.55	62.73	4.14	28.11	95.06	93.75	94.85
	Немагнитный	5.45	56.56	4.79	26.48	4.94	6.25	5.15
	Исходный	100.00	62.39	4.17	28.02	100.00	100.00	100.00

Один из важных вопросов совершенствования технологии обогащения тиманских железосодержащих бокситов — извлечение из них редких и редкоземельных элементов. Решению такой задачи может способствовать радиационно-термическая обработка исходных бокситов, после которой повышается извлечение оксидов скандия, церия и ниобия в магнитную фракцию при сухом обогащении (табл. 2). Редкие и редкоземельные элементы концентрируются в магнитных продуктах совместно с алюминием, кремнием и железом (табл. 1, 2). С целью селективного выделения соединений редких и редкоземельных элементов необходима селективная дезинтеграция сухого магнитного продукта с последующим выделением или растворением минералов, содержащих редкие и редкоземельные элементы.

ТАБЛИЦА 2. Влияние видов обработки бокситов на извлечение редких и редкоземельных элементов при сухой магнитной сепарации, %

Условие обработки	Напряженность магнитного поля, кА/м	Продукт	Выход	Содержание			Извлечение		
				Sc ₂ O ₃	CeO ₂	Nb ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	CeO ₂	Nb ₂ O ₅
Без обработки	320	Магнитный	17.56	0.0094	0.0214	0.0097	16.54	12.54	16.98
		Немагнитный	82.44	0.0101	0.0318	0.0101	83.46	87.46	83.02
		Итого	100.00	0.0100	0.0300	0.0100	100.00	100.00	100.00
В печи 60 мин при 600 °С	320	Магнитный	3.06	0.0092	0.0280	0.0094	3.12	2.96	3.19
		Немагнитный	96.94	0.0090	0.0290	0.0090	96.88	97.04	96.81
		Итого	100.00	0.0090	0.0290	0.0090	100.00	100.00	100.00
20 мин на ИЛУ-6 при 600 °С	320	Магнитный	78.32	0.0102	0.0290	0.0102	79.67	81.11	80.02
		Немагнитный	21.68	0.0094	0.0244	0.0092	20.33	18.89	19.98
		Итого	100.00	0.0100	0.0280	0.0100	100.00	100.00	100.00
Без обработки	480	Магнитный	53.42	0.0093	0.0325	0.0095	55.36	57.90	56.46
		Немагнитный	46.58	0.0086	0.0271	0.0084	44.62	42.10	43.54
		Итого	100.00	0.0090	0.0300	0.0090	100.00	100.00	100.00
20 мин на ИЛУ-6 при 600 °С	480	Магнитный	94.08	0.0099	0.0290	0.0098	93.19	94.08	92.13
		Немагнитный	5.92	0.0115	0.0290	0.0133	6.81	5.92	7.97
		Итого	100.00	0.0100	0.0290	0.0100	100.00	100.00	100.00

В соответствии с [27] селективную дезинтеграцию сухого магнитного продукта можно осуществить с использованием вертикальных мельниц Vertimill и биссерных мельниц HIGmill, которые позволят раскрыть сростки минералов крупностью 20–30 мкм и, как следствие, улучшить качество концентратов и повысить извлечение тонких частиц ценных компонентов.

ФАЗОВАЯ ГЕТЕРОГЕНИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ БОКСИТОВ

В результате обработки с помощью потока ускоренных электронов в исследуемых бокситах за счет имеющихся в их составе микроэлементов появляются новообразованные сплавы металлов и минералы в виде хорошо обособленных индивидов, которые варьируют по форме от изометричных до игольчатых и по размеру от субмикронного до 0.5 мм. В их число входят Au, Pb, Al, Cu, Zn, оксиды Sn, Ta, Nb, Zr и лантаноидов, силикаты (циркон, каолинит) и сульфаты (рис. 7, 8).

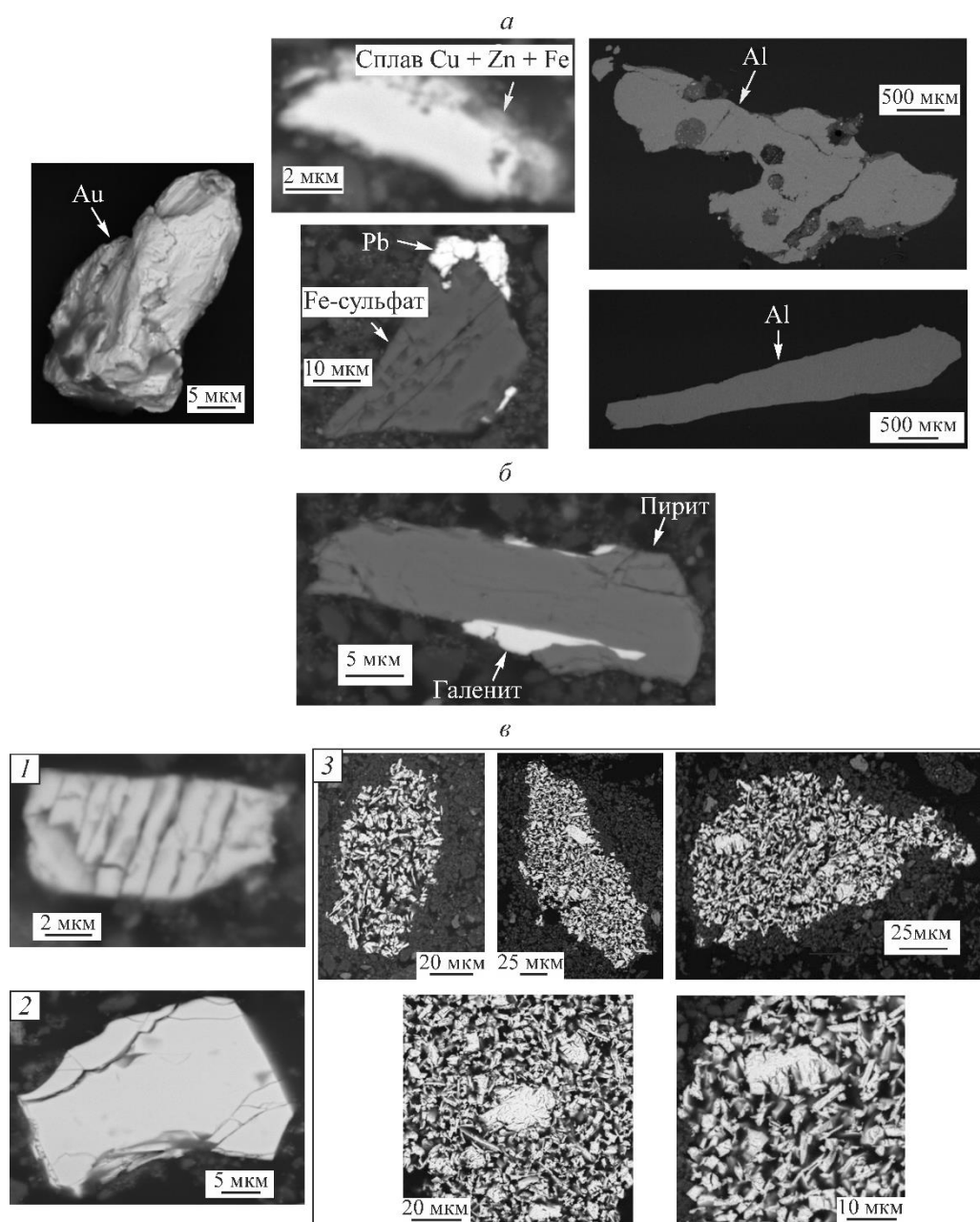


Рис. 7. Выделения самородных металлов и сплавов (а), сульфида железа (б) и оксидов (в) в радиационно-термически модифицированных бокситах: 1 — оксид олова; 2 — оксиды лантаноидов; 3 — тантал-ниобат. СЭМ-изображения в режиме упруго отраженных электронов

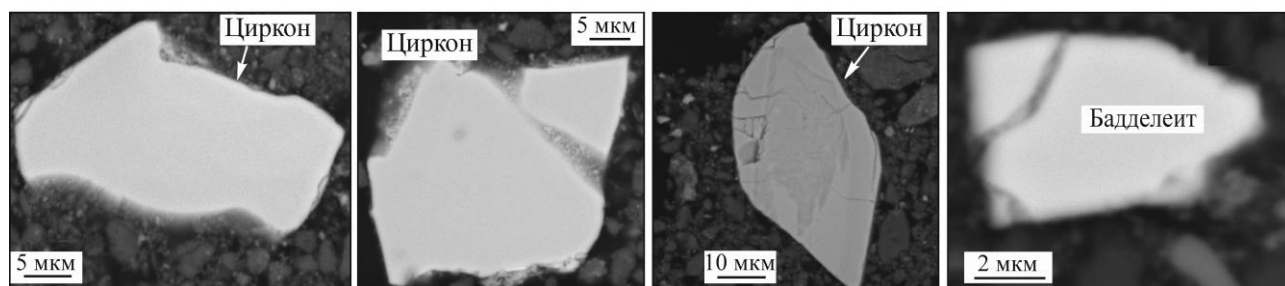


Рис. 8. Выделения новообразованных циркона и бадделеита в радиационно-термически модифицированных бокситах. СЭМ-изображения в режиме упруго отраженных электронов

Выявленные в модифицированных бокситах новообразованные минералы образованы микроэлементами, находящимися в исходных бокситах в повышенных концентрациях [15]. Основные новообразованные минеральные фазы и соединения в радиационно-термически преобразованных железистых бокситах представлены в следующем обобщенном виде [15]:

- самородные металлы и сплавы: золото $\text{Au}_{0.81-0.83}\text{Ag}_{0.16-0.19}\text{Fe}_{0-0.01}$, свинец Pb, самородный алюминий $\text{Al}_{0.88-1}\text{Fe}_{0-0.11}\text{Mn}_{0-0.01}$, латунь $\text{Cu}_{0.6-0.62}\text{Zn}_{0.36}\text{Fe}_{0.02-0.04}$;
- сульфиды: пирит $\text{Fe}_{0.98}(\text{S}_{1.99}\text{Sb}_{0.01})$, галенит PbS ;
- оксиды: рутил $(\text{Ti}_{0.99}\text{Fe}_{0.01})\text{O}_2$, бадделеит $(\text{Zr}_{0.95}\text{Hf}_{0.01}\text{Al}_{0.01}\text{Fe}_{0.03})\text{O}_2$, оксигидроксид титана $(\text{Ti}_{2.88-3.56}\text{Al}_{0.12-0.68}\text{Fe}_{0.30-0.32}\text{Si}_{0-0.08}\text{V}_{0-0.04})_4\text{O}_6(\text{OH})_{3.04-3.56}$, оксиды олова $(\text{Sn}_{0.95}\text{Fe}_{0.04}\text{Al}_{0.01})\text{O}_{1.95}(\text{OH})_{0.05}$, ниобат-танталат $(\text{Ta}_{2.17}\text{Nb}_{0.98}(\text{Ce}, \text{Nd})_{0.07}\text{U}_{0.28}\text{Na}_{1.33}\text{Ca}_{1.12}\text{Si}_{0.77}\text{Ti}_{0.07}\text{Fe}_{0.14})_7\text{O}_{12.04}\text{F}_{0.98}$, гадолиний-цериевые оксиды $(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.04-0.18}^{3+}\text{Gd}_{1.75-1.96})_7\text{O}_{13}$ и $(\text{Ce}_{2.95}\text{Gd}_{1.82}\text{Fe}_{0.23})_5\text{O}_8(\text{OH})_{1.89}$;
- кислородные соли: сульфат $(\text{Fe}_{0.56}\text{Mg}_{0.29}\text{Mn}_{0.15})[\text{SO}_4]$;
- силикаты: каолинит $(\text{Al}_{3.96}\text{Fe}_{0.04})_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, циркон $(\text{Zr}_{0.91-1.01}\text{Sc}_{0-0.04}\text{Hf}_{0-0.02}\text{Al}_{0-0.03}\text{Fe}_{0-0.03}\text{Ca}_{0-0.03}\text{U}_{0-0.02}\text{Y}_{0-0.02})[\text{SiO}_4]$.

ПЕРЕРАБОТКА ЖЕЛЕЗОСОДЕЖАЩИХ БОКСИТОВ

Выбор технологической схемы переработки бокситов зависит от их состава. Производство алюминия из бокситов осуществляется в две стадии: сначала химическими методами получают глинозем, затем из него путем электролиза в расплаве фтористых солей алюминия выделяют чистый металл. При получении глинозема используют гидрохимический метод Байера, метод спекания, а также комбинированный метод Байер-спекание (параллельный и последовательный варианты). Принципиальная технологическая схема процесса Байера заключается в выщелачивании тонкоизмельченного боксита концентрированным раствором едкого натра, в результате чего глинозем переходит в раствор в форме алюмината натрия. Из алюминатного раствора, очищенного от красного шлама, осаждают гидроокись алюминия (глинозем).

Низкокачественные бокситы перерабатывают более сложным способом — методом спекания, при котором трехкомпонентную шихту (смесь измельченного боксита с известняком и содой) спекают при 1250 °С во вращающихся печах. Полученный спек выщелачивают щелочным раствором слабых концентраций. Осажденную гидроокись отделяют и фильтруют. Параллельная комбинированная схема Байер-спекание предусматривает одновременную переработку на одном заводе высококачественных и низкосортных (высококремнистых) бокситов. Последовательная комбинированная схема данного метода включает переработку бокситов на глинозем вначале методом Байера, а затем глинозем доизвлекается из красных шламов способом их спекания с известняком и содой.

Описанные способы получения алюминия — весьма сложные процессы, однако позволяют получить максимальное количество металла из породы. Совершенствование методов переработки бокситов продолжается в направлении разработки инновационных технологий с учетом последних достижений фундаментальных наук, в первую очередь наноминералогии [28].

ВЫВОДЫ

На примере железистых бокситов с повышенным содержанием тонких частиц ценных компонентов при их модификации ускоренными электронами установлено образование металлических сплавов и новых минералов в виде крупных обособленных индивидов. Результат достигается вследствие разупрочнения и разрыва первичных химических связей металлов с алюмо- и железоксидным матриксом, последующей диффузии и сегрегации металлов с образованием собственных фаз.

Благодаря радиационно-термическому воздействию, выявлен эффект фазовой гетерогенизации, позволяющий извлекать из некондиционных бокситов и красных шламов тонкие частицы промышленно ценных компонентов. Выявленный природный феномен может проявиться и в других типах руд, например в благородно- и редкометалльных, что откроет перспективу их обогащения с применением обработки ускоренными электронами и традиционных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации № 2914-р от 22.12.2018 г. — М., 2018.
2. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации № 50-р от 16.01.1996 г. — М., 1996.
3. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации № 2473-р от 30.08.2022 г. — М., 2022.
4. **О состоянии** и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 г. / Государственный доклад Министерства природных ресурсов и экологии РФ. — М., 2022. — 621 с.
5. **Klychkarev D. S., Volkova N. M., and Komyn M. F.** The problems associated with using nonconventional rare-earth minerals, *J. Geochem. Exploitation*, 2013, Vol. 133. — P. 133–138.
6. **Borra C. R., Mermans J., Blanpain B., Pountikes Y. B., and Gerven T.** Selective recovery of rare earths from bauxite residue by combination of sulfation, roasting and leaching, *J. Miner. Eng.*, 2016, Vol. 92. — P. 151–159.
7. **Borra C. R., Pontikes Y., Binnemans K., and Gerven T.** Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud), *J. Miner. Eng.*, 2015, Vol. 76. — P. 20–27.
8. **Ключкарев Д. С.** К вопросу о редкоземельной составляющей бокситов Республики Коми // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVII геол. съезда Республики Коми. Т. III. — Сыктывкар: Геопринт, 2019. — С. 189–192.
9. **Davris P., Balomenos E., Panias D., and Paspaliaris I.** Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue, *Hydrometallurgy*, 2016, Vol. 164. — P. 125–135.
10. **Котова О. Б., Вахрушев А. В.** Бокситы Тимана: минералого-технологические особенности // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2011. — № 3. — С. 12–16.
11. **Беляев В. В., Яцкевич Б. А., Швецова И. В.** Девонские бокситы Тимана. — Сыктывкар: Геопринт, 1997. — 111 с.
12. **Лихачев В. В.** Редкометалльность бокситоносной коры выветривания Среднего Тимана. — Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 1993. — 200 с.
13. **Вахрушев А. В.** Первая находка самородного золота и теллура в бокситах Вежаю-Ворыквинского месторождения (Средний Тиман) // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2011. — № 7. — С. 23–25.
14. **Чантурия В. А.** Роль инновационных технологий обогащения и глубокой переработки минерального сырья в развитии минерально-сырьевой базы России // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья: материалы Междунар. конф. (Плаксинские чтения – 2023). — М.: Спутник+, 2023. — С. 3–6.
15. **Размыслов И. Н., Котова О. Б., Силаев В. И., Ростовцев В. И., Киселева Д. В., Кондратьев С. А.** Микрофазовая гетерогенизация железистых бокситов в результате радиационно-термической обработки // ФТПРПИ. — 2019. — № 5. — С. 128–140.
16. **Вахрушев А. В.** Кристаллохимия минералов бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента. — Сыктывкар: Геопринт, 2012. — С. 32–34.
17. **Вахрушев А. В., Лютое В. П., Силаев В. И.** Кристаллохимические особенности железистых минералов в бокситах Вежаю-Ворыквинского месторождения (Средний Тиман) // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2012. — № 10. — С. 14–18.

18. Котова О. Б., Размыслов И. Н., Ростовцев В. И., Силаев В. И. Радиационно-термическое модифицирование железистых бокситов в процессах их переработки // Обогащение руд. — 2016. — № 4. — С. 16–22.
19. Вахрушев А. В. Минералого-технологические особенности тонкодисперсной составляющей бокситов Среднего Тимана: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Сыктывкар, 2012. — 16 с.
20. 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.
21. Плаксин И. Н. Обогащение полезных ископаемых. — М.: Наука, 1970. — С. 292–300.
22. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Научные основы и перспективы промышленного использования энергии ускоренных электронов в обогатительных процессах // Горн. журн. — 1995. — № 7. — С. 53–57.
23. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бакшеева И. И. Исследования прочностных свойств керновых образцов горных пород с применением их обработки пучком высокоэнергетических электронов // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 168–176.
24. Ростовцев В. И. Пути повышения извлечения микро- и наночастиц ценных компонентов из природного и техногенного минерального сырья // ФТПРПИ. — 2021. — № 4. — С. 131–141.
25. Levin I. and Brandon D. Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences, J. Am. Ceram. Soc., 1998, Vol. 81. — P. 1995–2012.
26. Wilson S. J. and McConnell J. D. C. A kinetic study of the system γ -AlOOH / Al₂O₃, J. Solid State Chemistry, 1980, Vol. 34. — P. 315–322.
27. Информационно-аналитические материалы: Мировые достижения развития методов, техники и технологий переработки минерального сырья. Серия: Обогащение минерального сырья. — М.: Изд-во ВИМС, 2020. — 52 с.
28. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. — СПб.: Наука, 2005. — 581 с.

Поступила в редакцию 25/X 2023

После доработки 12/XI 2023

Принята к публикации 16/XI 2023