

УДК 549.08:622.7

**МИКРОФАЗОВАЯ ГЕТЕРОГЕНИЗАЦИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ БОКСИТОВ
В РЕЗУЛЬТАТЕ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

**И. Н. Размыслов¹, О. Б. Котова¹, В. И. Силаев¹, В. И. Ростовцев²,
Д. В. Киселева³, С. А. Кондратьев²**

¹*Институт геологии им. Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН,*

E-mail: razmyslov-i@mail.ru, ул. Первомайская, 54, 167982, г. Сыктывкар, Россия

²*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*

E-mail: kondr@misd.nsc.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

³*Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН,*

E-mail: podarenka@mail.ru, ул. Академика Вонсовского, 15, 620016, г. Екатеринбург, Россия

Представлены результаты радиационно-термического модифицирования среднетиманских железистых бокситов, включая ранее неизвестный феномен фазовой гетерогенизации — образование собственных минералов первоначально эндокриптно рассеянными благородными, цветными, редкими и редкоземельными микроэлементами. Сделан вывод о возможности использования этого феномена для промышленного использования некондиционных бокситов, красных шламов и других труднообогатимых руд.

Средний Тиман, железистые бокситы, радиационно-термические преобразования, фазовая гетерогенизация, совершенствование способов переработки минерального сырья

DOI: 10.15372/FTPRPI20190514

Важная задача отечественной бокситодобывающей отрасли и алюминиевой промышленности — освоение бокситовых месторождений Ворыквинской группы на Среднем Тимане, суммарные запасы бокситов которых составляют 237 млн т, из них 51 % приходится на Вежаю-Ворыквинское месторождение [1, 2]. В общем балансе запасов на этом месторождении относительно высококачественные маложелезистые бокситы (байеровские сорта руд с кремниевым модулем 7–8) составляют 4.9 млн т, т. е. ~4 % разведанных запасов. Остальное обеспечивают низкокачественные железистые бокситы, плохо утилизируемые не только традиционными методами (гравитационным, флотационным, магнитным), но и более современными (рентгенорадиометрическим и гидрохимическим). Это стало большой эколого-экономической проблемой из-за громадного накопления на рудниках практически неиспользуемых красных шламов, обогащенных редкими и редкоземельными металлами.

Исследования выполнены при финансовой поддержке государственных заданий (№ АААА-А18-118053090045-8, № АААА-А19-119031390057-5), программы УрО РАН (проект № 18-5-5-44) и гранта РНФ (№ 16-17-10283).

Извлечение промышленно ценных микроэлементов из бокситов и красных шламов, в которых после байеровского процесса сосредоточивается 60–100 % лантаноидов, является актуальной задачей, которая до последнего времени решалась способами селективного выщелачивания с использованием сильных кислот, щелочно-алюминатных растворов, трифторметилсульфонила [3–7]. Максимальный результат такого выщелачивания — извлечение 45–50 % скандия и 70–85 % редких земель при существенном загрязнении концентратов редких и редкоземельных металлов кальцием, натрием, железом, алюминием, титаном, кремнием, а окружающей среды — вредными химическими отходами. В России разработан комплексный способ извлечения металлов из руд, включающий предварительную обработку минерального сырья ускоренными электронами с энергией до 1.7 МэВ [8]. Однако и он не решил проблему загрязнения редкометалльных концентратов вредными примесями.

Цель настоящей работы — радиационно-термическое модифицирование железистых разновидностей бокситов [9, 10], что привело к обнаружению ранее неизвестного и впервые описанного феномена фазовой гетерогенизации с образованием за счет эндокриптно рассеянных в бокситовом веществе промышленно ценных благородных, цветных, редких и редкоземельных металлов их собственных минералов. Это открывает путь к разработке более рентабельных и менее вредных для окружающей среды способов переработки минерального сырья.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вежаю-Ворыквинское месторождение латеритных бокситов располагается в юго-восточной части Четласской горст-антиклинали на субстрате терригенно-карбонатной толщи быстринской свиты верхнего рифея. Бокситоносную залежь образуют линзовидно-пластовые тела часто усложненной формы мощностью 1.5–32.0 м. Состав железистых бокситов варьирует от гематит-гетит-бемитового до шамозит (бертьерин)-бемитового с небольшой примесью диаспора [11, 12]. Их текстура обломочно-бобовая, структура связующей массы алевро-пелитовая. Исследовались типичные образцы железистых бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения, которые по литохимическим модулям относятся к окисленным норможелезистым (супержелезистым в части красных шламов) супергидролизатам (табл. 1). После байеровского процесса в образующихся за счет исходных бокситов красных шламах сокращаются содержания Al_2O_3 в 5 раз, SiO_2 и TiO_2 в 1.5–2.0 раза, но увеличиваются содержания Fe_2O_3 в 1–2 раза, P_2O_5 — 2.5–3.0, Na_2O — 25–30, CaO — 50–55, SO_3 — 40–45 раз.

Нормативно-минеральный состав исследуемых бокситов определяется следующим образом (мол. %): бемит 42–55, гетит + гематит 20–29, бертьерин 5–20, каолинит 0–12, рутил + анатаз 2–3. Фазовый состав подтверждается данными термического, рентгеноструктурного и ИК-спектроскопического методов [11, 12]. В ИК-спектрах исходных бокситов наблюдается серия четко прописанных полос поглощения на бемите и хорошо структурированная полоса поглощения на группах OH^- (рис. 1). Согласно полученным мессбауэровским спектрам, железистые оксиды в исследуемых бокситах включают 50 % гематита, 16 — “дефектного” гематита (маггемита), 17 — гетита и гидрогетита, 17 % — наноразмерных фаз с парамагнитными и супермагнитными свойствами. При магнитной сепарации такой боксит разделяется на магнитную (15–20 %) и немагнитную (80–85 %) фракции.

ТАБЛИЦА 1. Валовый химический состав, мас. %

Компонент	1	2	3	4	5
SiO ₂	4.71	4.93	8.29	10.20	5.34
TiO ₂	2.48	2.50	4.18	5.70	4.98
ZrO ₂	0.11	0.11	—	—	—
Al ₂ O ₃	64.05	65.47	12.83	23.60	25.09
Cr ₂ O ₃	0.04	0.03	—	—	—
Fe ₂ O ₃	25.59	24.32	35.39	44.60	42.68
FeO	—	—	5.69	—	—
NiO	0.02	0.02	—	—	—
CuO	0.02	0.01	—	—	—
ZnO	0.02	0.03	—	—	—
MnO	1.37	1.11	0.43	—	—
MgO	0.52	0.44	1.47	—	—
CaO	0.32	0.32	16.83	11.20	9.05
SrO	0.05	0.04	—	—	—
Na ₂ O	0.10	0.10	2.82	2.50	1.99
K ₂ O	0.23	0.25	0.14	—	—
P ₂ O ₅	0.31	0.27	0.85	—	—
SO ₃	0.06	0.05	2.67	—	—
CO ₂	Н. о.	Н. о.	6.32	—	—
H ₂ O	«	«	2.09	—	—
Литохимический модуль					
Кремниевый Al ₂ O ₃ / SiO ₂	13.60	13.30	1.50	2.30	4.70
Гидролизатный (TiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ + FeO) / SiO ₂	19.60	18.70	6.30	7.20	13.60
Железистый (Fe ₂ O ₃ + FeO + MnO) / (TiO ₂ + Al ₂ O ₃)	0.41	0.37	2.44	1.52	1.52

Примечание. Железистые бокситы и красные шламы (1, 2) Вежаю-Ворыквинского месторождения (3) и греческие бокситовые месторождения (4, 5)

В составе исследованных бокситов установлено 57 микроэлементов, включая 14 лантаноидов (табл. 2). Распределение большинства элементов по образцам исходных и радиационно-термически модифицированных бокситов равномерное, на что указывают коэффициенты вариации, изредка выходящие за пределы 90 %. Исключение составляют Ca, Sc, Gd, Bi, отличающиеся особой неравномерностью распределения по рудообразующим минералам. В составе выявленных микроэлементов представлены металлы щелочные 4.5 %, щелочноземельные — 5.2, переходные — 24.6, гидролизаты, включая лантаноиды — 63.1, полуметаллы и неметаллы — 2.6 %.

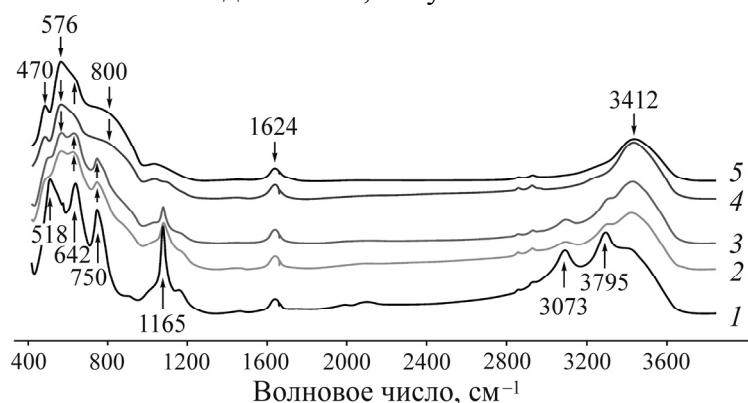


Рис. 1. Спектры ИК-поглощения, полученные для исходных железистых бокситов (1) и бокситов, подвергнутых радиационно-термической (2, 3) и термической (4, 5) обработке. Полосы поглощения, см⁻¹: 518, 642, 750, 1165 — бемит ν AlO(OH); 470, 576 — фазы Al₂O₃ и Fe₂O₃; 1624 — δ H₂O в гидрогетите; 3073, 3795 — группы OH⁻

ТАБЛИЦА 2. Микроэлементы в бокситах Вежаю-Ворыквинского месторождения, г/т

Элемент	Образец					Среднее $\pm$ среднеквадратическая ошибка (V , %)
	А	Б	В	Г	Д	
Li	50	30	50	50	24	40.80 $\pm$ 12.77 (31)
Na	500	600	600	700	500	580.00 $\pm$ 83.67 (14)
K	1000	900	900	1200	800	960.00 $\pm$ 151.66 (16)
Rb	4	2.2	2	4	2.5	2.94 $\pm$ 0.93 (32)
Cs	0.03	0.08	0.06	0.06	0.09	0.06 $\pm$ 0.02 (32)
Tl	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04 $\pm$ 0.01 (23)
Сумма	1554.1	1532.3	1552.1	1954.1	1326.6	1583.85 $\pm$ 227.93 (14)
Be	2.5	3.1	3.1	3	3.1	2.96 $\pm$ 0.26 (9)
Mg	2000	1300	1600	2300	450	1530.00 $\pm$ 713.79 (47)
Ca	31	0.6	0.6	47	0.6	15.96 $\pm$ 21.78 (136)
Sr	300	140	150	400	80	214.00 $\pm$ 131.83 (62)
Ba	50	70	40	60	26	49.20 $\pm$ 17.12 (35)
Сумма	2385.5	1513.7	1793.7	2810	559.7	1812.52 $\pm$ 863.49 (48)
Mn	9000	8000	7000	8000	7000	780.00 $\pm$ 836.66 (11)
Co	100	90	90	90	80	90.00 $\pm$ 7.07 (9)
Ni	190	180	170	180	160	176.00 $\pm$ 11.40 (6)
Cu	250	140	70	70	60	118.00 $\pm$ 80.44 (68)
Zn	140	200	160	170	150	164.00 $\pm$ 23.02 (14)
Mo	6	3.1	4.5	7	2.7	4.66 $\pm$ 1.84 (39)
Ag	1.7	1.7	1.8	2	1.9	1.82 $\pm$ 0.13 (7)
Cd	0.21	0.19	0.21	0.26	0.18	0.21 $\pm$ 0.03 (14)
Sn	10	10	10	12	9	10.20 $\pm$ 1.10 (11)
Pb	150	250	240	240	240	224.00 $\pm$ 41.59 (19)
Сумма	9847.9	8875.0	7746.5	8771.3	7703.8	8588.89 $\pm$ 893.49 (10)
Sc	60	10	20	60	2.2	30.44 $\pm$ 27.71 (91)
Ti	19000	20000	20000	21000	20000	20000.00 $\pm$ 707.11 (35)
V	260	250	250	270	250	256.00 $\pm$ 8.94 (3)
Cr	140	130	130	140	130	134.00 $\pm$ 5.48 (4)
Ga	60	60	60	60	50	58.00 $\pm$ 4.47 (8)
Ge	3	3	3	3	2.7	2.94 $\pm$ 0.13 (4)
Y	80	23	40	90	40	54.60 $\pm$ 28.82 (53)
Zr	800	400	600	800	400	600.00 $\pm$ 200.00 (33)
Nb	70	53	49	70	47	57.80 $\pm$ 11.35 (20)
Hf	15	12	17	16	12	14.40 $\pm$ 2.30 (16)
Ta	3.4	3.9	3.7	4	3.7	3.74 $\pm$ 0.23 (6)
W	5	7	6	6	6	6.00 $\pm$ 0.71 (12)
U	8	7	7	8	7	7.40 $\pm$ 0.55 (7)
Th	39	22.7	28.2	40	6	27.18 $\pm$ 13.91 (51)
Сумма	20543.4	20981.6	21213.9	22567.0	20956.6	21252.50 $\pm$ 773.49 (4)
La	180	160	150	220	40	150.00 $\pm$ 67.08 (45)
Ce	300	700	290	400	60	350.00 $\pm$ 231.95 (66)
Pr	40	30	30	40	7	29.40 $\pm$ 13.48 (46)
Nd	140	110	110	150	24	106.80 $\pm$ 49.61 (26)
Sm	23	17	18	24	3.4	17.08 $\pm$ 8.23 (48)
Eu	4	2.9	3.1	4	0.5	2.90 $\pm$ 1.43 (49)
Gd	18	150	14	18	5	41.00 $\pm$ 61.16 (149)
Tb	2.1	1.2	1.5	2	0.2	1.40 $\pm$ 0.77 (55)
Dy	12	6	9	13	1.1	8.32 $\pm$ 4.83 (58)
Ho	2.3	1.1	1.7	2.4	0.19	1.54 $\pm$ 0.92 (60)
Er	7	2.9	5	7	0.5	4.48 $\pm$ 2.80 (62)
Tm	1	0.39	0.7	1.1	0.07	0.65 $\pm$ 0.43 (66)
Yb	7	2.4	4.5	7	0.4	4.26 $\pm$ 2.89 (68)
Lu	1	0.4	0.6	1.1	0.06	0.63 $\pm$ 0.43 (68)
Сумма	737.4	1184.3	638.1	889.6	638.1	817.50 $\pm$ 229.42 (28)

Продолжение табл. 2

B	120	100	110	140	80	110.00±22.36 (20)
P	700	700	700	800	700	720.00±44.72 (6)
S	0.8	21	23	0.8	15	12.12±10.75 (89)
As	18.2	21	16.8	18	14	17.60±2.53 (14)
Se	1.8	0.49	0.68	1.5	0.105	0.92±0.71 (77)
Sb	13	12	11	13	11	12.00±1.00 (8)
Te	0.2	0.19	0.13	0.15	0.1	0.15±0.04 (26)
Bi	0.8	7	0.8	0.8	0.8	2.04±2.77 (136)
Сумма	854.8	861.7	862.4	974.2	821.0	874.83±58.12 (7)
Итого	35923.0	34948.6	33806.7	37966.3	32005.8	34930.09±2237.07 (6)

Примечание. Содержание микроэлементов определялось методом ИСП-МС в ЦКП УрО РАН “Геоаналитик”: А — исходные бокситы; Б — бокситы после нагревания до 600 °С; В — то же с быстрым охлаждением; Г — бокситы после нагревания до 600 °С и облучения; Д — магнитная фракция бокситов после нагревания до 600 °С и облучения

Расчеты кларков концентрации показали, что в составе среднетиманских бокситов дефицитными выступают щелочные и щелочноземельные металлы, а избыточными в последовательности увеличения ее степени — металлы-гидролизаты, включая лантаноиды, переходные и цветные металлы и далее полуметаллы и неметаллы (рис. 2а). Особенным является факт значительного в 8–10 раз обогащения исследуемых бокситов большинством лантаноидов, в частности церием и гадолинием (рис. 2б). Дефицит легко мигрирующих при выветривании щелочных и щелочноземельных металлов и, напротив, накопление гидролизатных элементов в остаточных продуктах химического выветривания выглядит закономерно, а сверхкларковый статус переходных металлов и полуметаллов-неметаллов требует дополнительного объяснения. Это обусловлено окислительными условиями минералообразования, при которых переходные элементы приобретают высшую валентность, не способствующую миграциям.

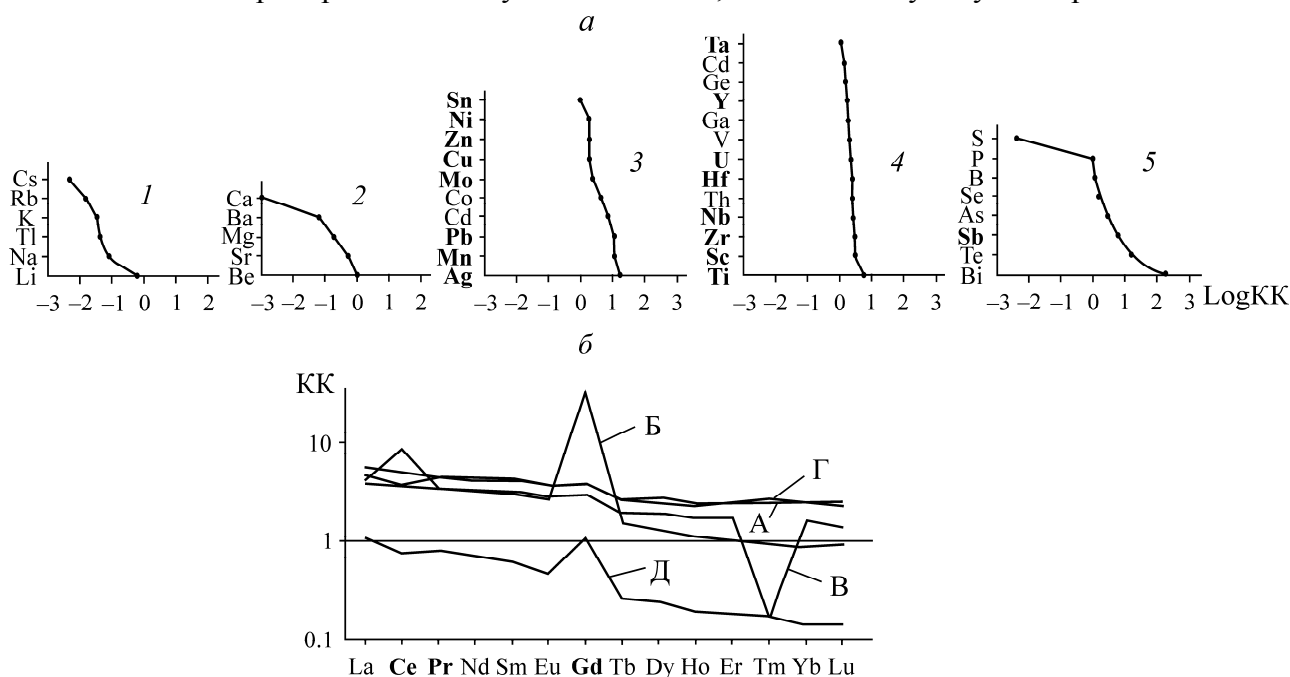


Рис. 2. Кларки концентрации микроэлементов относительно земной коры (а) и среднего постархейского австралийского сланца PAAS (б): 1 — щелочные металлы; 2 — щелочно-земельные металлы; 3 — переходные и цветные металлы; 4 — металлы-гидролизаты; 5 — полуметаллы и неметаллы; А–Д — образцы из табл. 2. Полу жирным шрифтом и точками выделены элементы, входящие в состав новообразованных в радиационно-термически преобразованных бокситах минералов

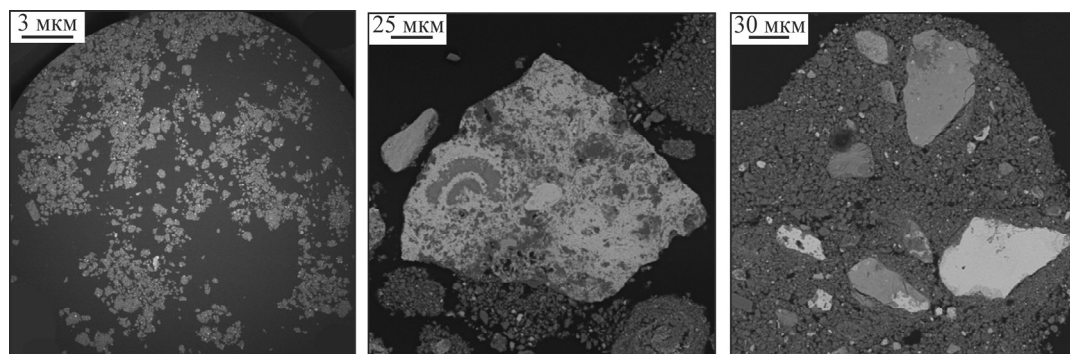


Рис. 3. Микростроение исходных железистых бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения. СЭМ-изображения в режиме упруго отраженных электронов

Сравнительный анализ показывает, что железистые бокситы с Вежаю-Ворыквинского месторождения по концентрации большинства редких и редкоземельных элементов превосходят типичные аналоги с месторождений Северо-Онежского и Среднеземноморского бокситоносных районов, а также с греческих и иранских месторождений [4–6, 13, 14]. Исследуемые бокситы по лантаноидам лишь на 15–70 % уступают красным шламам с греческих месторождений, которые рассматриваются как перспективный нетрадиционный источник редких и редкоземельных элементов.

Бокситы характеризуются бобовой текстурой, обусловленной сочетанием порфировых вкрапленников неправильной формы с размерами в плоскости $(49 \pm 38) \times (27 \pm 22)$ мкм, удлинением 1.91 ± 0.48 и глинистой структурой связующей массы с алевропелитовым размером частиц (рис. 3). Судя по результатам рентгеноспектрального микрозондового анализа (табл. 3), порфировые вкрапленники сложены гетитом и алюмогетитом (31 %), бемитом и феррибемитом (31), гематитом (30), рутилом (8 %). Связующая масса имеет преимущественно бемитовый состав.

ТАБЛИЦА 3. Химический состав порфировых вкрапленников в исходных железистых бокситах Вежаю-Ворыквинского месторождения

Формула	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	NiO	ZnO	MgO	CaO	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SO ₃
1	1.11	0.73	—	3.19	94.33	—	—	—	—	—	—	0.64	—
2	3.06	0.67	—	9.11	84.92	1.84	—	—	—	—	—	0.40	—
3	—	0.41	—	90.93	8.66	Н. о.	—	—	—	—	—	—	—
4	0.24	97.93	0.38	0.43	0.38	«	—	—	—	«	0.67	—	—
5	24.13	Н. о.	—	29.58	29.07	12.13	0.60	0.37	3.54	0.58	—	—	—
6	2.54	2.13	—	5.00	85.61	4.47	—	—	—	0.25	—	—	—
7	1.15	0.47	—	2.57	95.48	Н. о.	—	—	—	Н. о.	—	0.33	—
8	24.51	0.19	—	24.28	26.77	17.53	—	—	—	2.09	—	—	—
9	2.25	1.09	—	4.21	89.75	2.41	—	—	—	0.29	—	—	—
10	1.96	0.79	—	1.44	94.33	1.02	—	—	—	—	—	—	0.46
11	22.91	—	—	29.43	25.00	18.84	0.52	0.42	2.29	0.22	—	0.37	—
12	1.08	—	—	0.51	98.41	—	—	—	—	—	—	—	—
13	1.31	1.55	—	4.05	92.59	0.50	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. 1 — $(\text{Fe}_{0.94}\text{Al}_{0.04}\text{Si}_{0.01}\text{Ti}_{0.01})\text{O}(\text{OH})$; 2 — $(\text{Fe}_{0.83}\text{Al}_{0.12}\text{Si}_{0.04}\text{Ti}_{0.01})\text{O}(\text{OH})$; 3 — $(\text{Al}_{0.95}\text{Fe}_{0.04}\text{Ti}_{0.01})\text{O}(\text{OH})$; 4 — $(\text{Ti}_{0.97}(\text{Si},\text{Zr})_{0.01}\text{Al}_{0.01}\text{Fe}_{0.01})\text{O}_2$; 5 — $0.76(\text{Al}_{0.46}\text{Fe}_{0.32}\text{Mn}_{0.13}\text{Mg}_{0.07}\text{Ca}_{0.01}(\text{Ni},\text{Zn})_{0.01}\text{Mg})\text{O}(\text{OH}) + 0.24\text{SiO}_2$; 6 — $(\text{Fe}_{0.83}\text{Al}_{0.07}\text{Mn}_{0.04}\text{Ti}_{0.02}\text{Si}_{0.04})\text{O}(\text{OH})$; 7 — $(\text{Fe}_{0.95}\text{Al}_{0.04}(\text{Ti},\text{Si})_{0.01})\text{O}(\text{OH})$; 8 — $0.75(\text{Al}_{0.38}\text{Fe}_{0.30}\text{Mn}_{0.20}\text{Mg}_{0.09}\text{Ca}_{0.03})\text{O}(\text{OH}) + 0.25\text{SiO}_2$; 9 — $(\text{Fe}_{1.76}\text{Al}_{0.12}\text{Mn}_{0.04}\text{Ti}_{0.02}\text{Si}_{0.06})_2\text{O}_3$; 10 — $(\text{Fe}_{1.88}\text{Al}_{0.04}\text{Mn}_{0.02}\text{Ti}_{0.02}\text{Si}_{0.04})_2\text{O}_3$; 11 — $(\text{Al}_{0.47}\text{Fe}_{0.25}\text{Mn}_{0.22}\text{Mg}_{0.05}(\text{Ni},\text{Zn})_{0.01})\text{O}(\text{OH}) + 0.24\text{SiO}_2$; 12 — $(\text{Fe}_{1.96}\text{Al}_{0.02}\text{Si}_{0.02})_2\text{O}_3$; 13 — $(\text{Fe}_{1.82}\text{Al}_{0.12}\text{Ti}_{0.02}\text{Si}_{0.02}\text{Mn}_{0.02})_2\text{O}_3$

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ БОКСИТОВ

Радиационно-термическое модифицирование относится к способам немеханического энергетического воздействия на первичное минеральное сырье, изначально предназначавшимся для повышения эффективности рудоподготовки и обогащения [8, 15–17]. Проведенные эксперименты показали, что последствия радиационно-термических воздействий на железистые бокситы простираются гораздо дальше, чем разуплотнение исходного рудного вещества, дезинтеграция руд, увеличение степени их измельчения, изменение магнитных свойств.

Эксперименты проводились в два этапа: нагревание до разных температур и то же 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 [10].

Нагревание первичных железистых бокситов до 500 и 600 °С с четырехкратной выдержкой по 60 мин привело к полной дегидратации оксигидроксидов алюминия и железа и образованию за их счет $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ (шпинелид с дефектной структурой) и маггемита ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) при незначительном изменении структуры и магнитных свойств породы. В ИК-спектрах, полученных от термически обработанных образцов (рис. 1), доминируют полосы поглощения на фазах Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Полоса поглощения на бемите сильно размытая, на группах ОН — сдвинутая в коротковолновую область, уширенная и бесструктурная. Объемная магнитная восприимчивость бокситов практически не изменялась ($\chi = 25 - 30 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). Содержание магнитной фракции в отожженных образцах по мере нагревания до 500 °С медленно сокращалось с 18.0 до 12.5 %, при дальнейшем нагревании до 600 °С скачкообразно упало до 3 %. Валовый химический состав отожженных образцов не изменился, содержание микроэлементов заметно выросло: Cu — на 70–250 %, Zn — 20–25, Cd — 20–380, Zr — 2–20, Nb — 15–20, Sc — 25–40, Y — 35–70, Се — 25–360, Nd — 1–10 %. Это обусловлено значительной дегидратацией исследуемых бокситов при нагревании.

Радиационно-термическое преобразование железистых бокситов осуществлялось в ходе нагревания до 500–600 °С с двукратной выдержкой по 20 мин и в сочетании с облучением. Микроструктура, химический и микроэлементный состав обработанных образцов не претерпели 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, $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$, магнетит, маггемит, рутил, анатаз и реликтовый бемит. В ИК-спектрах наблюдается уширенная, но отчетливая линия поглощения на бемите, линии поглощения на фазах Al_2O_3 и Fe_2O_3 и полоса поглощения на группах ОН[–], сдвинутая в коротковолновую область, с признаками структурности. Явное присутствие в радиационно-термически модифицированных бокситах реликтового бемита объясняется в 6 раз менее длительной выдержкой в ходе нагревания, чем в эксперименте с нагреванием без облучения.

Структура рассматриваемых образцов, т. е. сочетание порфирировых вкрапленников и связующей алевропелитовой массы (рис. 4), 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 — 47, рутилом (анатазом) — 5 %. Появление в составе радиационно-термически преобразованных бокситов сильно магнитных минералов привело к радикальной магнитной перестройке руд. Если в интервале нагревания до 500 °С в составе бокситов резко преобладала немагнитная фракция, то 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 таким образом модифицированных бокситов разительно отличается от картины только термических превращений, при которых доля магнитной фракции не возрастает, а сокращается (рис. 5).

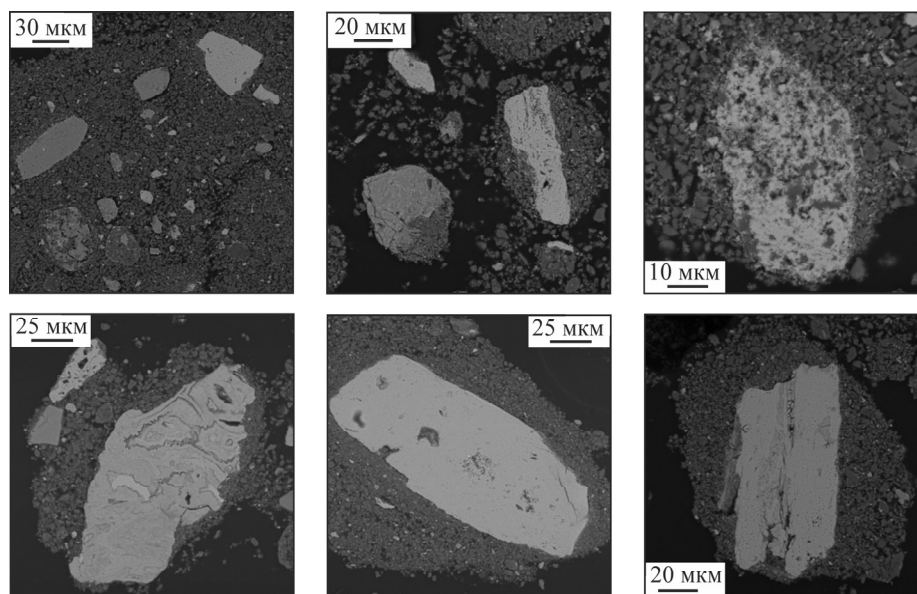


Рис. 4. Микростроение радиационно-термически модифицированных железистых бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения. СЭМ-изображения в режиме упруго отраженных электронов

Согласно расчетам, химический состав порфировых вкрапленников в радиационно-термически преобразованных бокситах стал по сравнению с таковым в исходных бокситах гораздо более неоднородным, особенно по Cr_2O_3 , NiO , ZnO , K_2O , P_2O_5 , V_2O_3 (табл. 4). Радиационная обработка привела к заметному химическому диспропорционированию вещества бокситов на уровне породообразующих компонентов (рис. 6). Более детальный анализ показал, что диспропорционирование затронуло и микроэлементы, демонстрирующие тенденцию к перераспределению между магнитной и немагнитной фракциями. Выяснилось, что Sc, Ce и Nb в результате радиационно-термического преобразования многократно накапливаются в магнитной фракции и изначально тяготеют в бокситах к железистому веществу.

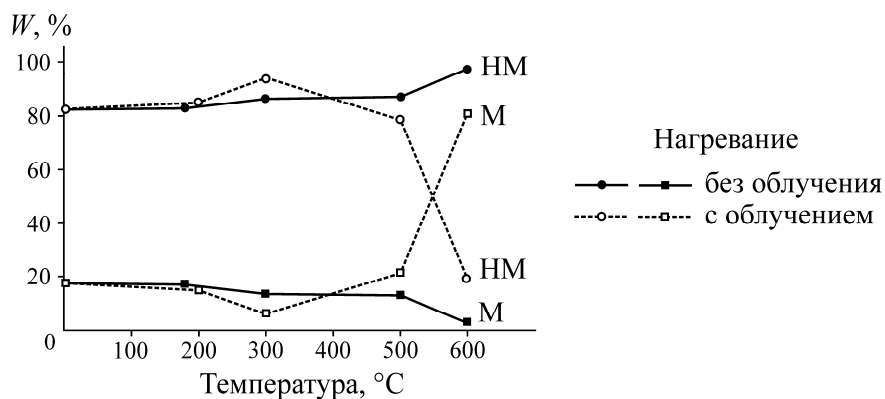


Рис. 5. Изменение выхода W немагнитной HM и магнитной M фракций для термически и радиационно-термически преобразованных бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения

ТАБЛИЦА 4. Химический состав порфировых вкрапленников в радиационно-термически преобразованных железистых бокситах из Вежаю-Ворыквинского месторождения

Формула	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	NiO	ZnO	MgO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	V ₂ O ₅
1	0.84	—	—	1.35	97.05	—	0.25	—	—	—	0.16	—	0.35	—	—
2	0.87	—	—	92.43	6.33	—	0.37	—	—	—	—	—	—	—	—
3	0.28	92.18	1.58	1.08	4.72	—	Н. о.	—	—	—	—	—	—	0.16	—
4	4.30	2.58	—	54.54	36.97	—	1.16	—	—	—	0.20	0.18	0.07	—	—
5	—	0.17	—	97.56	2.27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	22.62	0.38	0.81	27.75	23.17	—	20.89	0.42	0.52	2.75	0.28	0.41	—	—	—
7	1.49	1.44	—	2.25	93.62	0.18	0.61	—	—	—	0.11	—	0.30	—	—
8	1.12	0.60	—	88.60	9.44	—	—	—	—	—	—	—	—	0.24	—
9	23.66	—	—	29.55	23.47	—	20.32	—	—	2.74	0.26	—	—	—	—
10	2.67	0.33	—	1.51	95.19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	2.08	—	—	0.43	97.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	0.55	0.31	—	1.56	97.58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13	1.74	—	—	2.29	95.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	1.14	1.74	—	2.88	93.74	—	0.50	—	—	—	—	—	—	—	—
15	1.23	1.87	—	3.68	93.00	—	—	—	—	—	—	—	0.22	—	—
16	1.67	0.65	—	79.19	18.19	—	0.30	—	—	—	—	—	Н. о.	—	—
17	0.75	0.65	—	66.29	32.06	—	—	—	—	—	—	—	0.25	—	—
18	1.63	0.38	—	3.87	93.31	—	—	—	—	—	—	—	0.60	—	0.21
19	25.90	0.26	—	24.54	37.01	—	7.41	—	0.31	3.04	1.09	0.44	—	—	—

Примечание. Анализы: 1–8 — магнитные фракции из бокситов, нагретых до 500 °С; 9–13 — магнитные фракции из бокситов, нагретых до 600 °С; 14–17 — немагнитные фракции из бокситов, нагретых до 500 °С; 18, 19 — немагнитные фракции из бокситов, нагретых до 600 °С. Результаты приведены к 100 %, Н. о. — компонент не обнаружен. Эмпирические формулы: 1 — $(\text{Fe}_{1.94}\text{Al}_{0.04}(\text{Mn}, \text{Ni}, \text{Ca}, \text{Si})_{0.02})_2\text{O}_3$; 2 — $(\text{Al}_{1.88}\text{Fe}_{0.10}(\text{Mn}, \text{Si})_{0.02})_2\text{O}_3$; 3 — $(\text{Ti}_{0.92}\text{Al}_{0.02}\text{Fe}_{0.05}(\text{Zr}, \text{Si})_{0.01})\text{O}_2$; 4 — $(\text{Al}_{1.26}\text{Fe}_{0.60}\text{Mn}_{0.02}\text{Si}_{0.08}\text{Ti}_{0.04})_2\text{O}_3$; 5 — $(\text{Al}_{1.96}\text{Fe}_{0.04})_2\text{O}_3$; 6 — $0.77(\text{Al}_{0.88}\text{Fe}_{0.50}\text{Mn}_{0.46}\text{Zr}_{0.02}(\text{Ti}, \text{Ni}, \text{Zn})_{0.02}\text{Mg}_{0.10}(\text{Ca}, \text{K})_{0.02})_2\text{O}_3 + 0.23\text{SiO}_2$; 7 — $(\text{Fe}_{1.86}\text{Al}_{0.06}\text{Ti}_{0.02}\text{Si}_{0.04}(\text{Mn}, \text{Cr})_{0.01})_2\text{O}_3$; 8 — $(\text{Al}_{1.84}\text{Fe}_{0.14}(\text{Si}, \text{Ti})_{0.02})_2\text{O}_3$; 9 — $0.76(\text{Al}_{0.94}\text{Fe}_{0.48}\text{Mn}_{0.46}\text{Mg}_{0.12})_2\text{O}_3 + 0.24\text{SiO}_2$; 10 — $(\text{Fe}_{1.88}\text{Al}_{0.04}\text{Si}_{0.08})_2\text{O}_3$; 11 — $(\text{Fe}_{1.92}\text{Al}_{0.02}\text{Si}_{0.06})_2\text{O}_3$; 12 — $(\text{Fe}_{1.94}\text{Al}_{0.04}(\text{Si}, \text{Ti})_{0.02})_2\text{O}_3$; 13 — $(\text{Fe}_{1.88}\text{Al}_{0.08}\text{Si}_{0.04})_2\text{O}_3$; 14 — $(\text{Fe}_{1.86}\text{Al}_{0.08}\text{Si}_{0.04}\text{Ti}_{0.02})_2\text{O}_3$; 15 — $(\text{Fe}_{1.84}\text{Al}_{0.10}\text{Si}_{0.02}\text{Ti}_{0.04})_2\text{O}_3$; 16 — $(\text{Al}_{1.68}\text{Fe}_{0.28}(\text{Si}, \text{Ti})_{0.04})_2\text{O}_3$; 17 — $(\text{Al}_{1.48}\text{Fe}_{0.50}(\text{Si}, \text{Ti})_{0.02})_2\text{O}_3$; 18 — $(\text{Fe}_{1.82}\text{Al}_{0.12}\text{Si}_{0.04}(\text{Ti}, \text{V})_{0.02})_2\text{O}_3$; 19 — $0.73(\text{Al}_{0.82}\text{Fe}_{0.80}\text{Mn}_{0.18}\text{Mg}_{0.14}\text{Ca}_{0.04}(\text{Zn}, \text{K})_{0.02})_2\text{O}_3 + 0.27\text{SiO}_2$

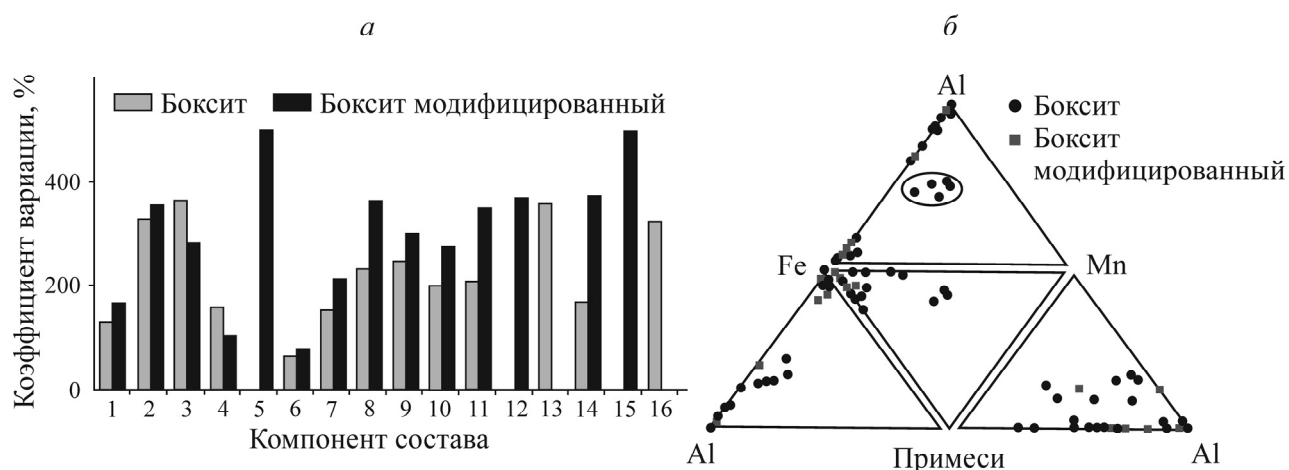


Рис. 6. Химическое диспропорционирование бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения в ходе радиационно-термического преобразования (а) и тетраэдрическая развертка химизма бокситов в части основных элементов состава (б); 1–16 — компоненты состава SiO₂, TiO₂, ZrO₂, Al₂O₃, Cr₂O₃, FeO, MnO, NiO, ZnO, MgO, CaO, K₂O, Nb₂O₅, P₂O₅, V₂O₅, SO₃

ФАЗОВАЯ ГЕТЕРОГЕНИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БОКСИТОВ

В результате радиационно-термической обработки в исследуемых бокситах за счет их микроэлементов появляются новообразованные минералы в виде хорошо обособленных индивидов, которые варьируют по форме от изометричных до игольчатых и размеру от субмикронного до 0.5 мм. В их число входят Au, Pb, Al, Cu, Zn, сульфиды (пирит, галенит), оксиды Sn, Ta, Nb, Zr и лантаноидов, силикаты (циркон, каолинит) и сульфаты (рис. 7, 8). Все выявленные в модифицированных бокситах новообразованные минералы образованы микроэлементами, находящимися в исходных бокситах в повышенных концентрациях (рис. 2).

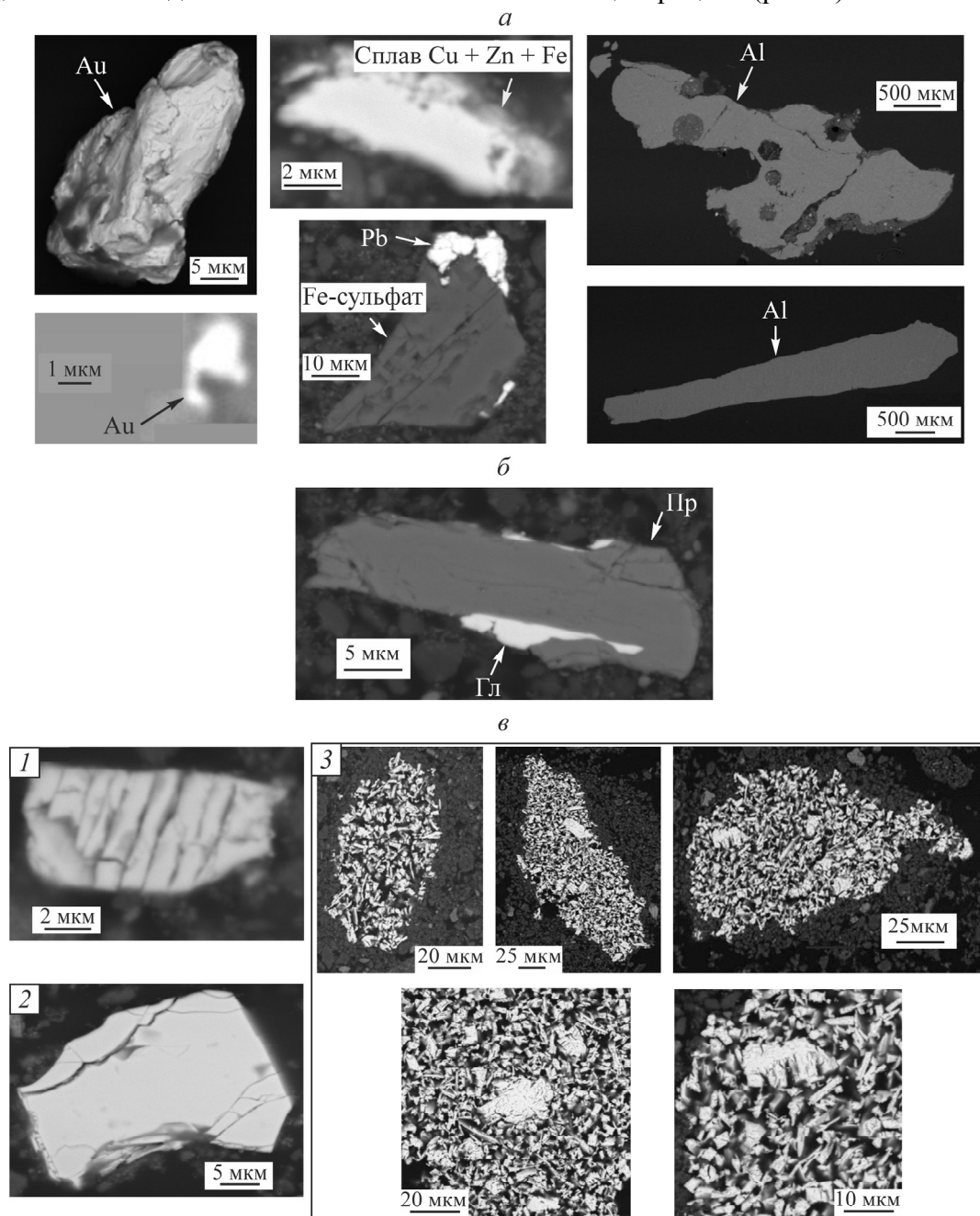


Рис. 7. Выделения самородно-металлических фаз (а), сульфата железа (б) и оксидов (в) в радиационно-термически модифицированных бокситах: 1 — оксид олова; 2 — оксиды лантаноидов; 3 — тантал-ниобат. СЭМ-изображения в режиме упруго отраженных электронов

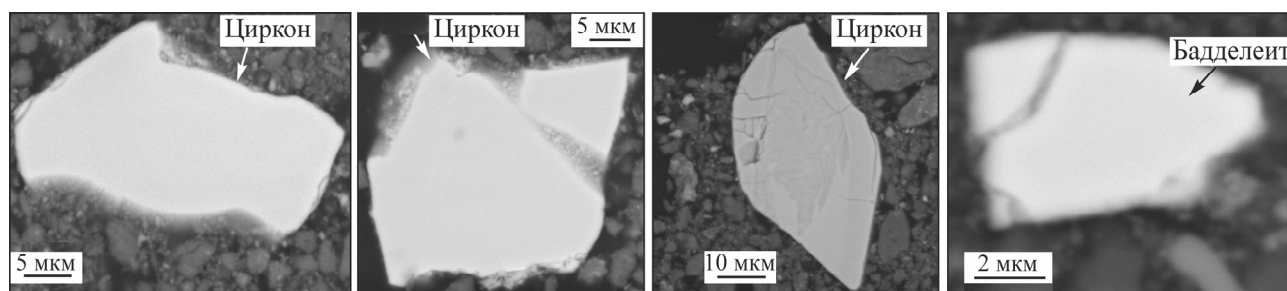


Рис. 8. Выделения новообразованного циркона и бадделейта в радиационно-термически модифицированных бокситах. СЭМ-изображения в режиме упруго отраженных электронов

Состав фаз широко варьирует, рассчитывая на характерные для соответствующих минералов стехиометрические пропорции (табл. 5–7). Реестр новообразованных минеральных фаз в радиационно-термически преобразованных железистых бокситах представим в обобщенном виде:

- 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 $(\text{Ti}_{0.99}\text{Fe}_{0.01})\text{O}_2$, бадделейт $(\text{Zr}_{0.95}\text{Hf}_{0.01}\text{Al}_{0.01}\text{Fe}_{0.03})\text{O}_2$, 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 $(\text{Zr}_{0.91-1.01}\text{Sc}_{0-0.04}\text{Hf}_{0-0.02}\text{Al}_{0-0.03}\text{Fe}_{0-0.03}\text{Ca}_{0-0.03}\text{U}_{0-0.02}\text{Y}_{0-0.02})(\text{SiO}_4)$.

ТАБЛИЦА 5. Химический состав самородно-металлических фаз

Au	Ag	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Al	Эмпирическая формула
88.88	11.12	—	—	—	—	—	—	$\text{Au}_{0.81}\text{Ag}_{0.19}$
90.06	9.53	0.41	—	—	—	—	—	$\text{Au}_{0.83}\text{Ag}_{0.16}\text{Fe}_{0.01}$
—	—	2.49	—	60.86	36.65	—	—	$\text{Cu}_{0.62}\text{Zn}_{0.36}\text{Fe}_{0.02}$
—	—	3.72	—	59.67	36.61	—	—	$\text{Cu}_{0.60}\text{Zn}_{0.36}\text{Fe}_{0.04}$
—	—	—	0.29	—	—	—	99.71	Al
—	—	17.33	—	—	—	—	82.67	$\text{Al}_{0.91}\text{Fe}_{0.09}$
—	—	—	0.36	—	—	—	99.64	Al
—	—	20.40	2.37	—	—	—	77.23	$\text{Al}_{0.88}\text{Fe}_{0.11}\text{Mn}_{0.01}$

ТАБЛИЦА 6. Химический состав церий-гадолиниевых оксидов

CeO_2	Gd_2O_3	Fe_2O_3	Эмпирическая формула
72.19	27.81	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.04}^{3+}\text{Gd}_{1.96})_7\text{O}_{13}$
74.95	25.05	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.25}^{3+}\text{Gd}_{1.75})_7\text{O}_{13}$
72.18	27.82	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.18}^{3+}\text{Gd}_{1.82})_7\text{O}_{13}$
76.70	23.30	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.04}^{3+}\text{Gd}_{1.96})_7\text{O}_{13}$
71.96	28.04	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.04}^{3+}\text{Gd}_{1.96})_7\text{O}_{13}$
70.78	29.22	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.04}^{3+}\text{Gd}_{1.96})_7\text{O}_{13}$
72.67	27.33	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.18}^{3+}\text{Gd}_{1.82})_7\text{O}_{13}$
73.10	26.90	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.18}^{3+}\text{Gd}_{1.82})_7\text{O}_{13}$
73.28	26.71	—	$(\text{Ce}_5^{4+}\text{Ce}_{0.18}^{3+}\text{Gd}_{1.82})_7\text{O}_{13}$
59.07	39.24	1.69	$(\text{Ce}_{2.95}\text{Gd}_{1.82}\text{Fe}_{0.20})_5\text{O}_9$

ТАБЛИЦА 7. Химический состав оксидов титана и алюминия

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	V ₂ O ₅	Эмпирическая формула
—	98.83	—	1.17	—	—	(Ti _{0.99} Fe _{0.01})O ₂
—	0.37	91.45	7.52	0.66	—	(Al _{1.89} Fe _{0.10} Mn _{0.01}) ₂ O ₃
1.85	77.16	11.82	8.52	—	0.65	(Ti _{2.88} Al _{0.68} Fe _{0.32} Si _{0.08} V _{0.04}) ₄ O ₆ (OH) _{3.04}
0.89	0.34	90.48	8.29	—	—	(Al _{1.86} Fe _{0.12} Si _{0.02}) ₂ O ₃
0.38	90.35	1.64	7.63	—	—	(Ti _{3.56} Al _{0.12} Fe _{0.32}) ₄ O ₆ (OH) _{3.56}

ТАБЛИЦА 8. Химический состав циркона и бадделеита

Формула	SiO ₂	ZrO ₂	HfO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Sc ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	UO ₃
1	23.81	15.51	—	0.52	16.66	0.33	—	34.83	5.14	1.74	1.10	0.36	—
2	31.91	65.95	1.34	—	—	—	—	0.80	—	—	—	—	—
3	32.42	66.61	0.27	—	—	—	—	0.70	—	—	«	—	—
4	30.46	58.68	2.25	—	1.73	1.33	2.39	1.50	—	—	1.24	—	0.42
5	31.47	64.77	—	—	0.79	0.76	—	1.55	—	—	0.66	—	—
6	34.16	68.79	1.09	—	—	—	—	0.76	—	—	—	—	—
7	34.17	67.20	1.10	—	0.72	1.15	—	0.91	—	—	0.75	—	—
8	32.58	64.58	1.56	—	—	—	—	1.28	—	—	—	—	—
9	28.15	67.23	1.09	—	0.72	1.15	—	0.91	—	—	0.75	—	—
10	29.33	68.83	1.08	—	—	—	—	0.76	—	—	—	—	—
11	29.05	68.73	1.39	—	—	—	—	0.83	—	—	—	—	—
12	—	96.14	1.40	—	0.25	—	—	2.21	—	—	—	—	—

Примечание. 1 — (Zr_{0.96}Sc_{0.04})[SiO₄]; 2 — (Zr_{1.01}Sc_{0.01})[SiO₄]; 3 — Zr[SiO₄]; 4 — (Zr_{0.94}Sc_{0.04}Hf_{0.02}(U,Y)_{0.04})_{1.04}[SiO₄]; 5 — (ZrSc_{0.02})_{1.02}[SiO₄]; 6 — (Zr_{0.98}Hf_{0.01})[SiO₄]; 7 — (Zr_{0.96}Sc_{0.03}Hf_{0.01})[SiO₄]; 8 — (Zr_{0.97}Hf_{0.01}Fe_{0.03})_{1.01}[SiO₄]; 9 — 0.88(Zr_{0.91}Hf_{0.01}Al_{0.03}Fe_{0.02}Ca_{0.03})[SiO₄] + 0.12ZrO₂; 10 — 0.92(Zr_{0.97}Hf_{0.01}Fe_{0.02}Ca_{0.03})[SiO₄]; 11 — (Zr_{0.95}Hf_{0.02}Fe_{0.03})[SiO₄]; 12 — (Zr_{0.95}Hf_{0.01}Al_{0.01}Fe_{0.03})O₂

ВЫВОДЫ

При нагревании бокситов наблюдался явный тренд минеральных превращений от оксигидроксидов к безводным оксидам алюминия и железа, а также тенденция к снижению степени кристалличности минерального матрикса. После радиационно-термической обработки в бокситах за счет эндокриптно рассеянных в исходном веществе микроэлементов образуется множество новых минералов в виде 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.

Вследствие радиационно-термической обработки в железистых бокситах происходит существенная фазовая гетерогенизация, открывающая возможность эффективного извлечения из некондиционных бокситов и красных шламов промышленно ценных компонентов экологически безопасными способами. Выявленный природный феномен может проявиться и в других типах руд с невидимыми формами локализации полезных компонентов, например в благородно- и редкометалльных, что откроет перспективу их обогащения неразрушающим и экологически благоприятным, а следовательно, высокoeкономичным радиационно-термическим способом.

Авторы выражают благодарность за проведение аналитических работ Центру коллективного пользования “Геонаука” Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО и Центру коллективного пользования “Геоаналитик” УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лихачев В. В.** Редкометалльность бокситоносной коры выветривания Среднего Тимана: дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 1993. — 224 с.
2. **Сиротин В. И., Гутникова Т. Н.** Освоение бокситовых месторождений Республики Коми — стратегическая задача развития горнорудной промышленности России // Горн. журн. — 2007. — № 3. — С. 71–74.
3. **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.
4. **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. Engin., 2016, Vol. 92. — P. 151–159.
5. **Borra C. R., Pontikes Y., Binnemans K., and Gerven T.** Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud), J. Min. Engin., 2015, Vol. 76. — P. 20–27.
6. **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.
7. **Davris P., Balomenos E., Panias D., and Paspaliaris I.** Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue (red mud), Hydrometallurgy, 2016, Vol. 164. — P. 125–135.
8. **Ростовцев В. И.** Теоретические основы и практика использования электрохимических и радиационных (ускоренных электронов) воздействий в процессах рудоподготовки и обогащения минерального сырья // Вестн. ЧитГУ. — 2010. — № 8. — С. 91–99.
9. **Razmyslov I. N.** Energy-driven phase changes of bauxites // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2016. — № 6. — С. 33–34.
10. **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.
11. **Вахрушев А. В.** Кристаллохимия минералов бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента. — Сыктывкар: Геопринт, 2012. — С. 32–34.
12. **Вахрушев А. В., Лютоев 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.
13. **Mameli P., Mongelli G., Oggiano G., and Dinelli E.** Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from nurra (Western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity, J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.), 2007, Vol. 96. — P. 887–902.
14. **Colagari A. A., Kongarani F., and Abedini A.** Geochemistry of major, trace, and rare Earth elements in Biglar Perm-Triassic bauxite deposit northwest of Abgarm, Ghazvin Province, Iran, J. Sci. Islamic Republic of Iran, 2010, Vol. 21. — P. 225–236.
15. **Плаксин И. Н.** Обогащение полезных ископаемых. — М.: Наука, 1970. — С. 292–300.
16. **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.
17. **Кондратьев С. Ф., 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.

Поступила в редакцию 28/VI 2019

После доработки 11/VII 2019

Принята к публикации 23/IX 2019