

УДК 553.21

ДВА ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПА БОКСИТОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ИХ РЕДКОМЕТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ (СИБИРСКАЯ ПЛАТФОРМА)

© 2022 г. Н. М. Боева^{1,*}, М. А. Макарова¹, Е. С. Шпилова¹, А. Д. Слукин¹, Ф. П. Мельников¹, О. В. Каримова¹, Академик РАН Н. С. Бортников¹

Поступило 10.07.2022 г.
После доработки 07.08.2022 г.
Принято к публикации 08.08.2022 г.

Центральное месторождение бокситов на территории РФ является уникальным геологическим объектом. На нем присутствуют как исходные, латеритные бокситы, так и продукты их переотложения, латеритно-осадочные бокситы. Сравнительная характеристика остаточных латеритных бокситов *in situ* и латеритно-осадочных образований, изучение морфологии рудообразующих минералов бокситов и их состава дало возможность максимально достоверно восстановить генезис латеритных профилей и осадочных бокситоносных отложений, что имеет универсальное значение для познания подобных гипергенных полезных ископаемых. На примере месторождения Центральное Чадобецкого поднятия показана перспектива использования бокситов для попутного извлечения РЗЭ при их добыче.

Ключевые слова: боксит, латеритная кора выветривания, гиббсит, редкие и редкоземельные элементы

DOI: 10.31857/S2686739722601648

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения бокситов, традиционно являвшиеся основным источником алюминия, в последнее время стали объектами пристального внимания из-за значительного содержания в них редкоземельных элементов (РЗЭ) – лантаноидов + Sc + Y. Как правило, бокситы не рассматриваются как потенциальный источник РЗЭ. При разведке месторождений учитываются запасы только алюминия и галлия. В России повышенной редкометаллоносностью характеризуются осадочные бокситы Северо-Уральского, Южно-Уральского, Северо-Онежского районов, а также бокситы Среднего Тимана, где выявлен разнообразный комплекс редких металлов (Ga, Sc, Y, Cd, V, REE). В бокситах Тимана их содержания варьируют от 33 до 1007 г/т, на Сосьвинском месторождении содержание скандия достигает 72.65 г/т [1]. Средние содержания РЗЭ в бокситах Ворыквинской площади 600 г/т, максимальные – 3800–7900 г/т [2]. Многие месторождения карстовых бокситов обогащены РЗЭ, часто их концентрации являются экономически выгодными в каче-

стве побочных продуктов при производстве глинозема. В месторождениях карстовых бокситов Китая концентрации РЗЭ варьируются в широких пределах, от 17 до 3610 г/т [3]. По данным, полученным китайскими геологами, пригодными для переработки рудами являются коры выветривания (КВ) с содержанием РЗЭ 500 г/т. В одном из самых богатых РЗЭ месторождений карстовых бокситов Лас-Мерседес в Доминиканской Республике их содержание превышает 1500 г/т [4].

В бокситах встречаются в основном два вида РЗЭ: адсорбированные на поверхности диаспора, гиббсита и глинистых минералов в ионном состоянии [5]; и изоморфно замещающие аналогичный ион в некоторых минералах, таких как диаспор и гиббсит [6]. Экстракционные испытания показали, что степень адсорбции РЗЭ бокситовой рудой очень мала, т.е. значимые содержания могут быть только в случае присутствия их собственных минералов [7].

При исследовании карстовых бокситов Апулийской карбонатной платформы (южная Италия) G. Mongelli обнаружил кальциевые фторкарбонаты РЗЭ [8]. L. E. Mordberg выявил крандаллит в обогащенном алюминием профиле выветривания на Среднем Тимане в России [9]. A. Horbe и M. Costa описали циркон, ксенотим и торит в содержащем РЗЭ на месторождении бокситов Питинга в Бразилии [10]. Mordberg и соавт. изучали

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: boeva@igem.ru

минералы группы крандаллита на Шугорском месторождении бокситов в России [11]. М. Laskou и G. Andreou выявили рабдофан, флоренсит, чурчит и ксенотим на месторождении бокситов Парнас в Греции [12]. Р. Mamelì исследовал геологические, геохимические и минералогические особенности некоторых месторождений бокситов Нурры (Западная Сардиния, Италия) и показал, что основным минералом РЗЭ в них является минерал группы бастнезита [13]. Кроме того, некоторые исследования показывают, что содержание РЗЭ, особенно легких, сосредоточено в богатых железом горизонтах бокситов [13].

Нашей целью является исследование распределения РЗЭ в латеритных и осадочных бокситах месторождения Центральное. Источником РЗЭ в них являются карбонатиты Чадобецкого поднятия, имеющие промышленные концентрации этих элементов. В процессе латеритизации в бокситах образовались уникально высокие концентрации РЗЭ, что позволяет рассматривать их как комплексное сырье [14].

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Чадобецкое поднятие расположено в юго-западной части Сибирской платформы, на периферии области распространения Сибирской трапповой формации. Поднятие сложено наиболее древними для этого района протерозойскими отложениями, прорванными щелочными ультраосновными породами и окружено полями траппов, триасовыми и пермо-триасовыми породами. Чадобецкое поднятие представляет собой брахиантиклинальную складку эллипсоидной формы размером 45 × 35 км. В образовании поднятия главную роль сыграло внедрение щелочных ультраосновных пород. Чадобецкое поднятие окончательно сформировалось в раннем мезозое [15]. Кора выветривания развита на всех породах. Месторождения бокситов приурочены к сводовой части северного выступа поднятия. Центральное месторождение на территории РФ является уникальным геологическим объектом. Бокситы имеют относительно молодой мел-палеогеновый возраст, местами перекрыты только почвами, никогда не перекрываются другими породами и сохранились до наших дней в минимально измененном виде. Мощные останцы (до 8.5 м) латеритизированных пород сохранились *in situ*, а в эрозионных депрессиях, в бассейнах аккумуляции и перекрывающих почвах обнаружены их обильные латеритные обломки, состоящие из псевдоморфных латеритов по всем подстилающим породам (рис. 1).

Материнскими породами бокситов, образованных *in situ*, слагающих сводовые части поднятий, являются кварц-полевошпат-мусковитовые

сланцы, прорванные секущими телами ультраосновных пород, кимберлитов и карбонатитов. Латеритные бокситы являются реликтами мощного покрова, основная часть которого была размыва и стала источником залежей осадочных бокситов. Латеритно-осадочные бокситы Центрального месторождения являются продуктом латеритного выветривания всех пород, слагающих северный купол Чадобецкого поднятия, их частичной денудации и аккумуляции в эрозионных депрессиях. Минеральный состав бокситов: гиббсит, бемит, гетит, гематит, маггемит, анатаз, каолинит, кварц, реже магнетит, бейделлит, циркон, рутил. Вторичные минералы – сидерит и марказит [15]. Минеральный и химический состав бокситов тесно связан с материнскими породами и продуктами их выветривания, с химическими процессами, сопровождающими переход вещества остаточной *in situ* коры выветривания в латеритно-осадочные бокситы, а также с химическими превращениями осадка в области осадконакопления.

Сравнительная характеристика остаточных латеритных бокситов *in situ* и латеритно-осадочных образований, изучение морфологии рудообразующих минералов бокситов и их состава, в том числе распределение в них РЗЭ, дали возможность максимально достоверно восстановить генезис латеритных профилей и осадочных бокситоносных отложений, что имеет универсальное значение для познания подобных гипергенных полезных ископаемых.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было отобрано и изучено около 130 образцов бокситов и сопутствующих пород различного генезиса из скважин и обнажений Центрального месторождения.

Химический состав бокситов определен с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Axios "RANalytical". Определение РЗЭ проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе NexION 2000C фирмы PerkinElmer. Вскрытие образцов осуществляли по методике кислотного разложения [16]. Для расчета концентраций элементов использовалась серия градуировочных растворов с концентрациями от 0.01 до 10 нг/г, приготовленных из стандартного 68-элементного раствора ICP-MS-68A, HPS (A и B). В качестве внутреннего стандарта использовали ¹¹⁵In при конечной концентрации его в растворе 10 нг/г. Предел обнаружения элементов 10⁻³ нг/г, погрешность измерения составила 1–3 отн. %. Правильность определения содержания элементов контролировалась анализом международных стандартных образцов NBS SRM 697 (доминиканский боксит) и SGR-1b (сланец). Коэффициент вариации ре-

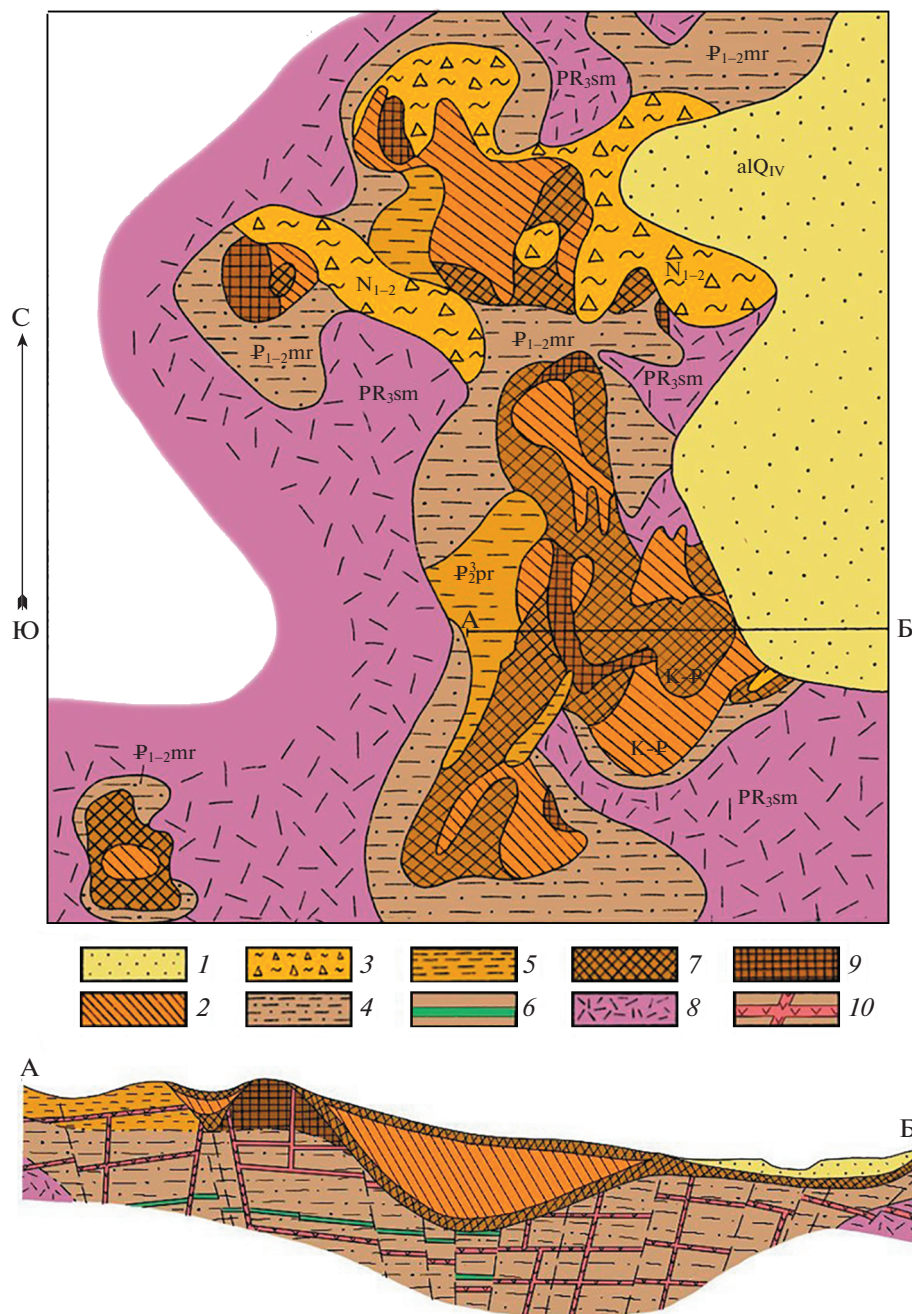


Рис. 1. Схематическая карта и разрез (масштаб: горизонтальный 1:8000, вертикальный 1:4000) Центрального месторождения: 1 – аллювиальные четвертичные отложения – aQ_{IV} ; 2 – латеритно-осадочные бокситы – К-Р; 3 – глины – N_{1-2} ; 4 – сланцы и песчаники P_{1-2mr} ; 5 – глины каолиновые P_{23pr} ; 6 – силлы щелочных ультрабазитов; 7 – глинистые бокситы – К-Р; 8 – материнские горные породы – сланцы и песчаники с силлами щелочных ультрабазитов – PR_{3sm} ; 9 – гиббситовые латериты *in situ* – К-Р, 10 – карбонатиты (По А.Д. Слукину [15] и Б.В. Шибистову [19] с дополнениями).

зультатов параллельных измерений содержаний РЗЭ в стандартных и выборочных образцах не превышал 5% уровня.

Исследование минерального состава проводилось рентгенофазовым методом (РФА), методом синхронного термического анализа (СТА) и с помощью сканирующих (СЭМ) CamScan 4 (“Cam-

bridge”) и TESCAN VEGA IXMU (“Tescan”) микроскопов с энергодисперсионной приставкой (ЭДС).

РФА выполнен на настольном рентгеновском дифрактометре AXRD, фирмы Proto Manufacturing при следующих режиме и условиях съемки: Co (λ 1.78897А) анод, рабочий режим 30 kV и 20 mA,

Таблица 1. Химический состав бокситов и сопутствующих пород, (мас. %)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ППП	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	MnO	P ₂ O ₅	S
Осадочные бокситы и бокситовые* породы												
2147	4.98	29.59	33.06	8.44	17.74	<0.1	<0.1	0.02	0.28	0.14	1.85	0.07
9	1.7	29.92	37.56	6.26	22.15	0.07	0.15	0.01	0.06	0.34	0.52	0.04
2148	2.67	32.18	33.13	7.22	18.84	<0.1	<0.1	0.02	0.26	0.12	1.75	0.08
2458	2.19	39.78	33.4	7.55	15.83	<0.1	<0.1	0.03	0.05	0.02	0.31	0.05
2144	4.4	41.42	16.32	8.67	22.29	<0.1	<0.1	0.04	0.26	0.06	2.12	0.1
2152	3.51	42.50	8.21	10.97	23.67	<0.1	<0.1	0.02	0.49	0.03	4.23	0.15
2145	2.48	43.52	13.56	9.64	23.56	<0.1	<0.1	0.02	0.2	<0.1	2.2	0.15
2143	2.72	47.49	6.96	8.59	25.49	<0.1	<0.1	0.02	0.37	0.04	3.19	0.17
Латеритные <i>in situ</i> бокситы и бокситовые * породы												
2	1.42	32.38	35.79	3.94	23.21	0.06	0.21	0.02	0.06	0.2	0.98	0.04
7	1.78	33.84	32.74	7.97	21.36	0.06	0.15	0.01	0.06	0.16	0.49	0.07
1	1.77	32.69	40.73	1.36	21.38	0.13	0.33	0.02	0.06	0.08	0.46	<0.02
3	1.55	44.73	22.92	3.74	25.36	0.07	0.12	0.01	0.02	0.14	0.33	0.04
4	1.53	46.42	21.63	2.57	25.92	0.05	0.07	0.01	0.03	0.09	0.51	0.03
5	1.8	48.88	17.71	3.17	26.72	0.11	0.09	0.01	0.05	0.1	0.39	0.03
37/1	3.58	57.86	5.6	1.74	29.92	<0.1	<0.1	0.03	0.04	0.06	0.41	0.06
Сопутствующие породы												
2156	34.4	34.59	3.48	3.58	12.99	<0.1	<0.1	0.04	0.76	0.01	4.78	0.08
2422С	30.9	32.38	16.51	3.72	13.94	<0.1	0.16	0.07	0.09	0.03	0.66	–
2422У	31.3	32.26	18.57	3.87	12.50	<0.1	0.17	0.05	0.1	0.09	0.32	–
2413	16.9	52.67	2.64	0.94	26.17	<0.1	<0.1	0.07	0.06	0.01	0.18	0.03
8	1.03	19.08	53.78	6.81	16.92	0.07	0.18	0.01	0.06	0.1	0.55	0.03

* – породы, с содержанием Al₂O₃ менее 40 мас. %.

начальный угол съемки 3° 2θ, конечный угол съемки 80° 2θ, шаг сканирования 0.05° 2θ, скорость вращения счетчика 0.05°/с, режим съемки образца непрерывный, с вращением, коллимационные щели 0.5 мм–2 мм–1 мм. Для управления дифрактометром и регистрации данных использовалась программа XRDWIN PD. Обработка дифрактограмм и диагностика минерального состава проводились с помощью программы JADE-6.5 и базы данных Powder Diffraction File (PDF-4). Количественный рентгенофазовый анализ образцов выполнен методом соотношения интенсивностей с помощью программы Profex 5.0.

СТА выполнялся на приборе (STA 449 F1 Jupiter “Netzsch”). Съемка производилась со скоростью 10°/мин в атмосфере Ag в тигельках с закрытыми крышками до температуры 1050°С. Масса навески составляла ~40 мг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химический состав

Были проанализированы бокситы латеритные *in situ* и осадочные. Результаты исследования

отображены в табл. 1. Содержание Al₂O₃ в двух разновидностях латеритизированных пород заметно не отличается и составляет от 30 до 58 мас. %. Если SiO₂ в бокситах *in situ* колеблется в пределах 1.4–1.8 мас. %, то в осадочных – 2.2–4.9, а в отдельных пробах достигает 16.9 мас. % за счет присутствия кремнийсодержащих минералов в глинистой фракции. В осадочных бокситах также наблюдается повышенное содержание TiO₂.

Для осадочно-латеритных бокситов в целом характерны повышенные содержания РЗЭ по сравнению с латеритными *in situ* бокситами (табл. 2). Содержание ΣREE колеблется от 574 до 22 540 г/т при среднем 10 819 г/т в осадочно-латеритных бокситах, и от 1424 до 3338 г/т при среднем 2001 г/т для остаточных *in situ*. Содержание ΣREE увеличивается с увеличением содержания La, Ce и Nd. LREE (La к Eu: от 487 до 20 819 г/т; среднее значение 10 142 г/т) заметно обогащены по сравнению с HREE (Gd к Lu: от 37 до 796 г/т; среднее значение 319 г/т) при почти постоянном соотношении LREE/HREE (от 13 до 39 при среднем 32). Концентрация Y находится в диапазоне от 51 до

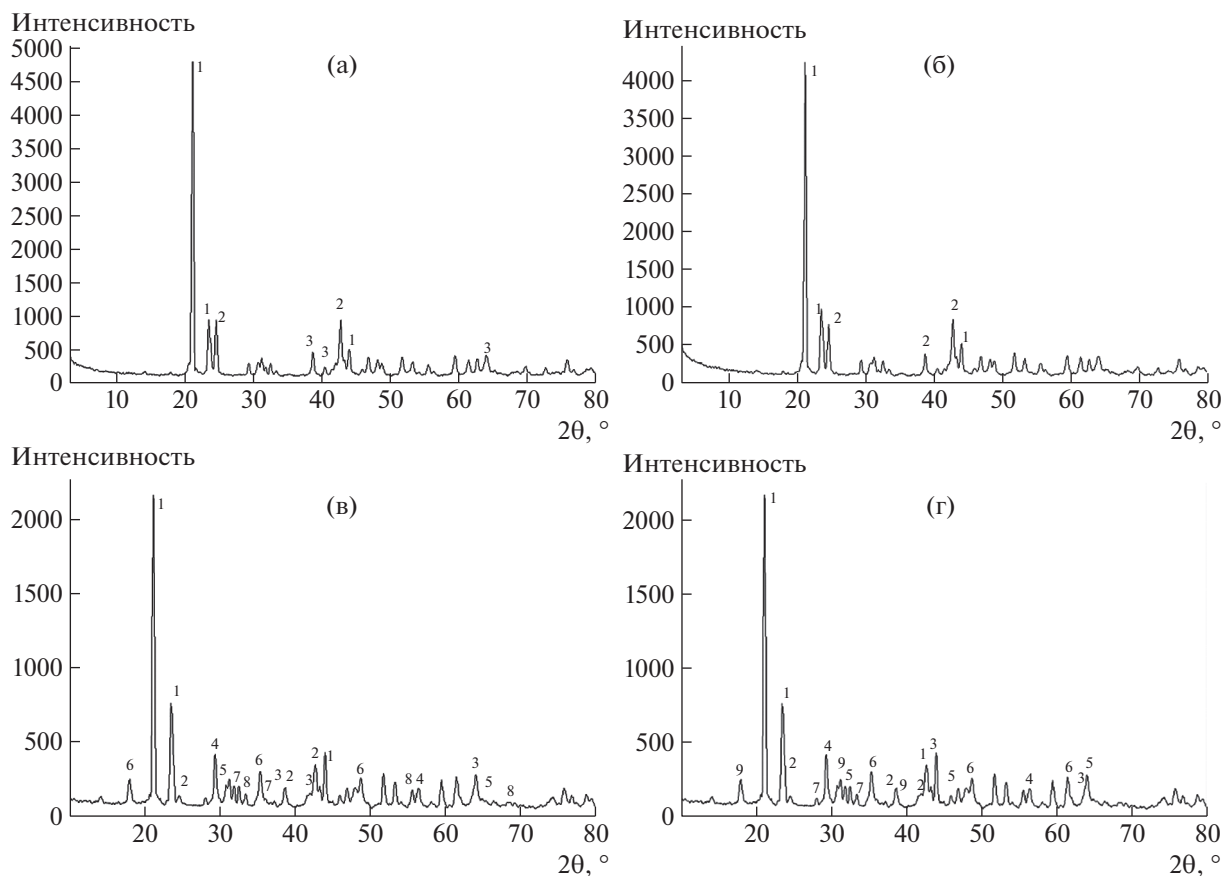


Рис. 2. Рентгенограммы латеритных *in situ* (а – обр. 3, б – обр. 5) и осадочных (в – обр. 2152, г – обр. 2143) бокситов. 1 – гиббсит, 2 – гетит, 3 – гематит, 4 – анатаз, 5 – рутил, 6 – крандаллит, 7 – монацит, 8 – церианит, 9 – каолинит.

774 г/т (среднее 263 г/т), концентрация Sc находится в диапазоне от 51 до 774 г/т (среднее значение 94 г/т). Латеритные бокситы также заметно обогащены LREE (La к Eu: от 1416 до 2036 г/т; среднее значение 1823 г/т) по сравнению с HREE (Gd к Lu: от 64 до 11 г/т; среднее значение 84 г/т) при также почти постоянном соотношении LREE/HREE (от 18 до 26 при среднем 22). Концентрация Y находится в диапазоне от 48 до 77 г/т (среднее 59.6 г/т), концентрация Sc находится в диапазоне от 30 до 40 г/т (среднее значение 34 г/т). Таким образом, характер распределения РЗЭ относительно однотипен для всех образцов бокситов однотипного генезиса и характеризуется значительным обогащением в области легких и средних лантаноидов, с максимальными значениями La, Ce и Nd. Слабовыраженные отрицательные аномалии церия и отрицательные аномалии европия однотипны для всех образцов бокситов ($Sc_{an} = 0.64-1.35$, $Eu_{an} = 0.31-0.37$).

Минеральный состав

Результаты рентгенофазового анализа представлены в табл. 3 и на рис. 2. Во всех образцах

бокситов основным минералом является гиббсит – от 40 до 90%. Гетита присутствует от 1.5 до 42%. Гематита – от 2 до 16%. Акцессорные минералы представлены каолинитом, кварцем, анатазом, рутилом. Во всех образцах с повышенными содержаниями РЗЭ, в осадочно-латеритных бокситах, обнаружен монацит – 1.5–3% и/или крандаллит – 5.5–18%, церианит – 1–2%. В латеритных *in situ* бокситах и сопутствующих породах отдельных минеральных фаз редких земель не обнаружено.

Синхронный термический анализ

На кривых ДСК гиббсита *in situ* присутствуют следующие эффекты: эндоэффект в интервале температур 200–450°C отвечает за выделение основной массы конституционной воды и частичное образование промежуточного продукта – бемита (дополнительный эндоэффект при температуре около 250°C). Эндоэффект при 450–600°C свидетельствует о дегидратации и разложении образовавшегося бемита. Экзоэффект при температуре 1050–1200°C отвечает за переход $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$ (рис. 3).

Таблица 2. Содержание редкоземельных элементов в бокситах и сопутствующих породах, (г/т)

	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Σ LRREE	Σ HRREE	Eu/Eu*	Ce/Ce*
Осадочные бокситы и бокситовые * породы																				
2147	124	147	2070	3700	452	1510	201	48	123	54	7	19	2	10	1.28	8467	7981	215	0.35	0.89
9	54	77	626	786	127	479	94	24	61	27	4	9	0.8	5	0.65	2374	2135	107	0.36	0.64
2148	121	188	2808	5102	599	2018	272	66	167	69	9	23	2	11	1.43	11458	10865	284	0.36	0.92
2458	54	51	109	275	20	67	12	3	11	11	2	6	0.8	5	0.74	629	487	37	0.31	1.35
2144	125	221	3585	6547	722	2494	351	87	211	85	10	27	2	13	1.54	14483	13787	350	0.37	0.94
2152	156	774	5234	9818	1129	4021	571	145	387	240	35	83	7	39	4.49	22644	20918	796	0.35	0.94
2145	125	278	4291	7790	845	2859	388	95	242	105	14	34	3	16	1.95	17087	16268	415	0.36	0.94
2143	128	443	4183	7872	889	3457	502	120	298	148	20	49	4	23	2.79	18138	17023	545	0.36	0.95
Латеритные <i>in situ</i> бокситы и бокситовые * породы																				
2	40	103	816	1111	179	721	169	43	114	46	6	12	0.9	5	0.56	3365	3039	183	0.35	0.74
7	61	84	688	1534	132	484	86	22	57	27	4	10	1	6	0.76	3197	2946	106	0.35	1.20
1	20	41	370	503	85	302	52	12	33	13	2	5	0.5	3	0.36	1441	1324	57	0.33	0.67
3	33	48	335	659	73	277	57	14	35	16	2	6	0.6	3	0.41	1561	1416	64	0.37	0.98
4	30	77	569	733	125	486	99	24	64	27	4	9	0.9	5	0.71	2254	2036	111	0.35	0.64
5	40	53	462	989	94	373	80	19	45	19	3	6	0.6	4	0.45	2187	2016	77	0.37	1.10
37/1	18	41	299	531	67	250	39	9.99	26	14	2	5	0.5	3	0.32	1306	1196	51	0.35	0.88
Сопутствующие породы																				
2156	75	356	1704	3559	384	1209	189	51	133	69	12	34	4	24	3.24	7805	7096	278	0.36	1.03
2422С	55	125	1731	2375	285	910	133	36	97	46	6	14	1	6	0.69	5821	5740	172	0.35	0.75
2422У	37	58	458	817	92	325	47	12	31	14	2	6	0.6	3	0.43	1903	1752	57	0.34	0.92
2413	10	22	152	192	34	123	20	4.97	13	7	1	3	0.2	1	0.16	583	526	25	0.35	0.62
8	65	89	619	1047	116	420	81	21	58	29	4	9	1	5	0.66	2567	2305	107	0.34	0.89

Σ REE = Sc + Y + Σ (La–Lu); Σ LRREE = Σ (La–Eu); Σ HRREE = Σ (Gd–Eu); Eu/Eu* = (2Eu/Eu_N)/(Sm/Sm_N + Gd/Gd_N); Ce/Ce* = (2Ce/Ce_N)/(La/La_N + Pr/Pr_N), где N относится к нормированному по NASC.

Таблица 3. Результаты рентгенофазового анализа, (%)

	гиббсит	гетит	гематит	монацит	крандаллит	кварц	каолинит	анатаз	церианит	рутил
Осадочные бокситы и бокситовые породы										
2147	40	23	11		6.5		7	6.5		6
9	56	38	3			2				
2148	48	15	16		6		3	4.5		4
2152	59	3	4	1.5	18			6.3	2	6.3
2145	66	3	10	3	5.5		2	4		6.5
2143	65	1.5	4.5	1.5	17		2	5		3.5
2413	70						30			
Латеритные <i>in situ</i> бокситы и бокситовые породы										
2	63	36				1				
1	54	42	4							
7	63	27	8			2				
3	74	23	2			1				
4	76	19	4			1				
5	79	20				1				
37/1	90	4					6			
Подстилающие породы										
2422С		13			3		78	6		
8	47	39	10			4				

Сканирующая электронная микроскопия

В бокситах выявлены минералы с повышенным содержанием РЗЭ и редких металлов, изученных нами с помощью электронных микроскопов, которые позволили увидеть морфологию кристаллов монацита, церианита и крандаллита (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 1973 г. А.Д. Слукиним [15] по текстурно-структурным особенностям было выделено два генетических типа бокситов – латеритные и латеритно-осадочные. Одним из доказательств присутствия латеритных бокситов являются типоморфные особенности изученных минералов. Были продемонстрированы псевдоморфозы анатаза и перовскита, сохранившие форму октаэдрических кристаллов. Латеритные бокситы представляют собой твердые породы, великолепно сохранившие реликтовые текстуры и структуры материнских пород. Латериты по сланцам унаследовали слоистые и сланцеватые текстуры и алевропелитовую и микролепидобластовую структуру. Латериты по щелочным ультрабазитам – реликтовую порфиритовую структуру. Латеритные бокситы по кимберлитам сохраняют обломочную текстуру. В бокситообразовании осадочно-латеритных бокситов большую роль играет тонкодисперсное и коллоидное вещество. Характерным признаком

осадочно-латеритных бокситов является наличие оолитовых, пизолитовых, бобовых конкреционных образований.

Однако некоторые исследователи предполагают не остаточный латеритный генезис бокситов, а делювиально-пролювиальный [17]. Слоистость бокситов принималась не за реликтовую полосчатость, наследованную от сланцев или аргиллитов, а за осадочные бокситы озерного типа [18, 19].

Проведенные исследования подтверждают присутствие на месторождении двух генетических типов бокситов – латеритного и осадочно-латеритного.

При сопоставлении данных ИСП-МС выяснилось, что по сравнению с латеритными *in situ* бокситами, в осадочно-латеритных разновидностях содержания легких и средних РЗЭ значительно выше (рис. 5, табл. 2). Установлена слабо выраженная отрицательная корреляция содержания РЗЭ с железом (рис. 6). Корреляции с алюминием при этом не обнаружено (рис. 6). Для самых высококачественных бокситов, с содержанием глинозема более 50 мас. % наблюдаются резкие минимумы (более чем на порядок) в суммарном содержании РЗЭ. Подстилающие глинистые породы как для остаточных бокситов *in situ*, так и для осадочно-латеритных очень близки по содержанию РЗЭ, что говорит об их одинаковом генезисе. Содержание РЗЭ для всех глин близко к содер-

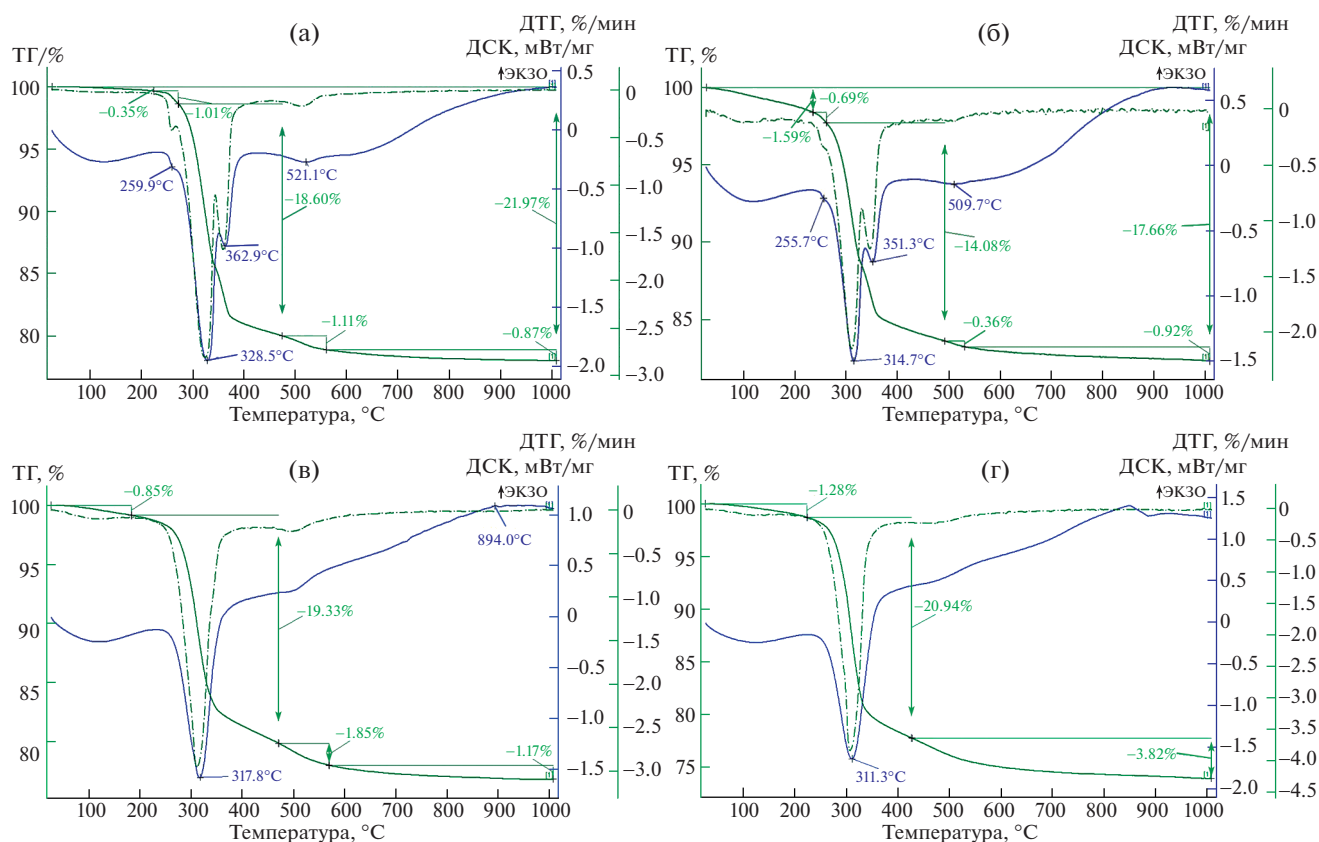


Рис. 3. Термические кривые бокситов латеритных *in situ* (а – обр. 1, б – обр. 8) и осадочных (в – обр. 2148, г – обр. 48).

жанию в латеритных бокситах, т.е. они частично обогащены редкоземельными элементами.

Основной минеральный состав двух генетических типов бокситов примерно одинаковый. Это объясняется тем, что при образовании осадочно-латеритных бокситов, в депрессии сносились обломки тех же самых латеритов, образованных *in situ*. Только в осадочно-латеритных бокситах были обнаружены минералы РЗЭ – монацит, крандаллит и церианит. Монацит представлен микрокристаллическим веществом с примесью сферических тел размером 0.5–1.2 мкм (рис. 4 а). В его составе преобладают Се, La, Nd, их общее содержание достигает 15 мас. %. Церианит образует плохо окристаллизованные овоиды (рис. 4 б). Крандаллит образует щетки призматических кристаллов (рис. 4 в). Часть катионов кальция замещена церием (до 5 мас. %). На рис. 7 представлено распределение РЗЭ в крандаллите. Они образовались в результате латеритизации денудированных карбонатов. Свежих пород в обломках не наблюдается. В латеритных *in situ* бокситах и сопутствующих породах самостоятельных минералов редких земель не обнаружено.

При изучении бокситов двух генетических типов методом термического анализа была установлена связь между размерами кристаллов гиббсита

и характером кривой ДСК. Отличительной особенностью гиббсита из латеритно-осадочных бокситов является отсутствие дополнительных эндоэффектов в интервале дегидроксилизации минерала (250–400°C). Количество образовавшегося при нагревании бемита зависит от размера кристаллов гиббсита. Чем больше размеры кристаллов, тем интенсивнее дополнительный эндоэффект при температуре около 250°C (рис. 3). По мнению Ф. Фройда, первым шагом в термическом разложении гиббсита являются освобождение протонов и реакция с гидроксильными ионами для формирования воды [20]. В результате этого процесса происходят изменения в химическом составе и плотности гиббсита. Осложнение первого эндоэффекта на кривой ДСК крупнозернистого гиббсита *in situ* из профиля коры выветривания связывается с формированием бемита через гидротермальную реакцию из-за замедленного удаления воды из больших частиц гиббсита. Таким образом, при температуре 250°C фиксируется новая фаза бемита. Эта реакция не наблюдалась на кривых ДСК тонкозернистого гиббсита латеритно-осадочного генезиса (рис. 3). В более мелких кристаллах гиббсита происходит разрушение структуры минерала с формированием γ глинозема. Это также может быть связано с раз-

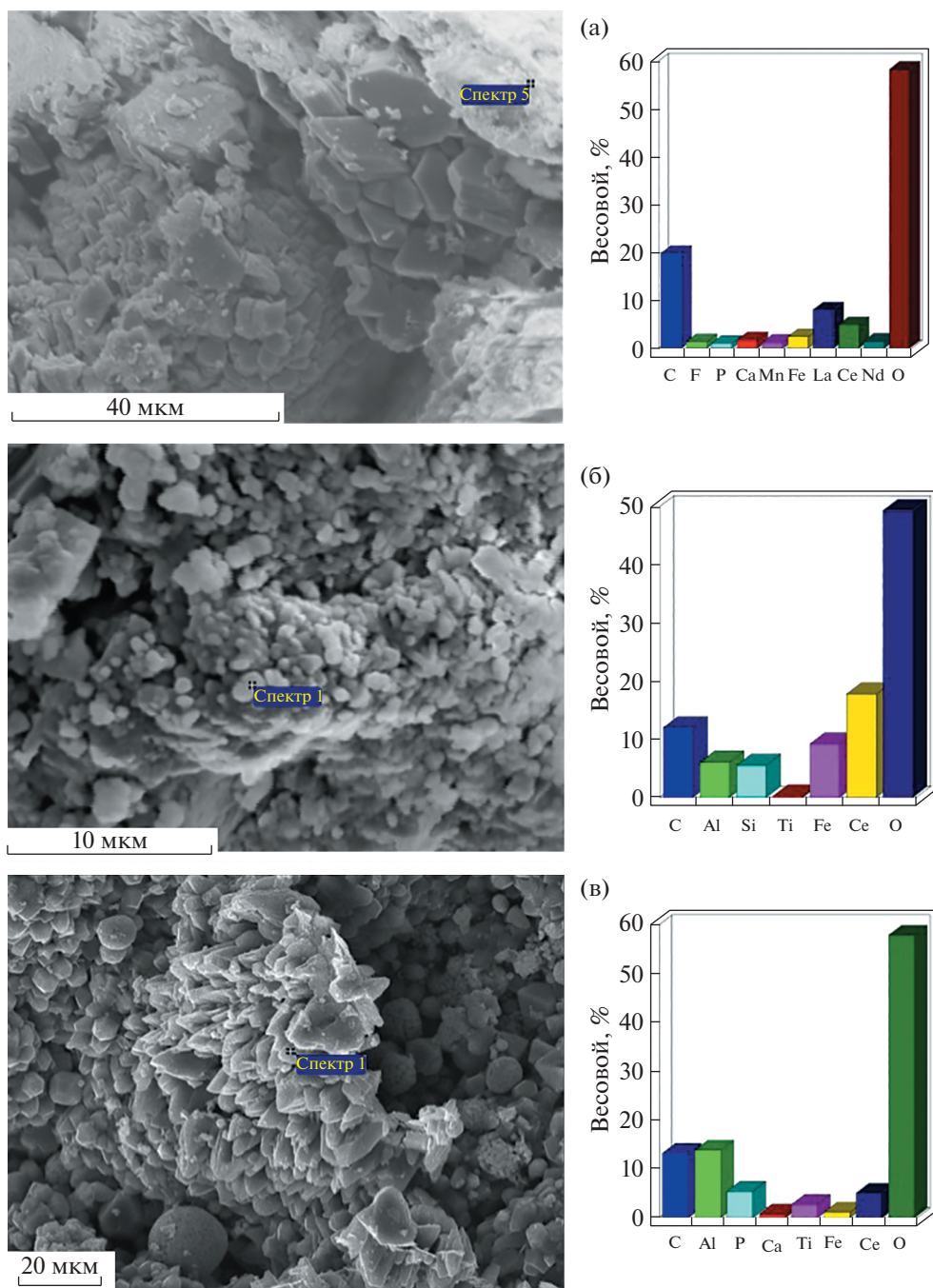


Рис. 4. Монацит (а), церианит (б) и крандаллит (в) и ЭДС состава.

порядоченностью структуры гиббсита, вызванной процессами переотложения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведен сравнительный анализ текстурно-структурных особенностей и состава латеритных бокситов *in situ* и продуктов их денудации. В латеритных бокситах, кроме зоны педотурбации, хорошо сохраняются реликтовые текстурно-

структурные особенности латеритных пород — одного из главных индикаторов их генезиса. В зоне педотурбации все минералы подвержены биохимическому воздействию. Именно такой материал подвергается денудации в первую очередь и в наибольшем объеме. При этом обладающие низкой твердостью кристаллические зерна гиббсита и каолинита окатываются, приобретают оvoidные, реже сферические формы, покрываются

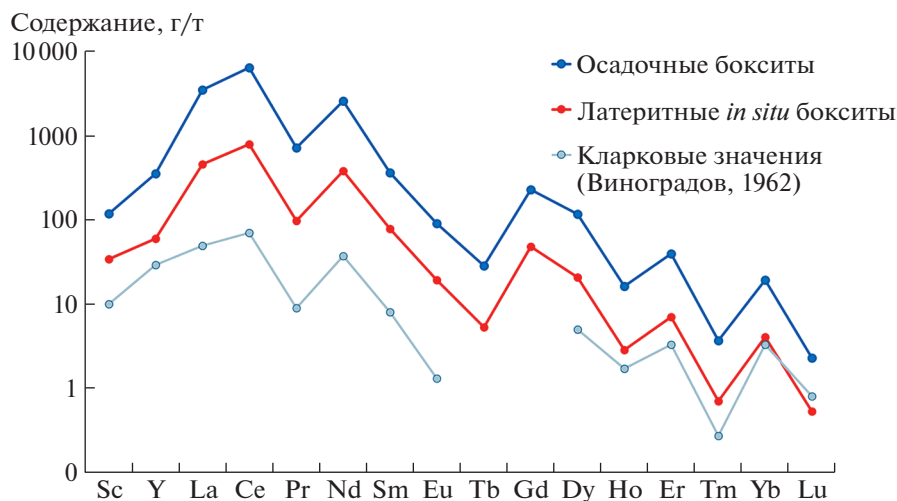


Рис. 5. Распределение РЗЭ в латеритных и латеритно-осадочных бокситах.

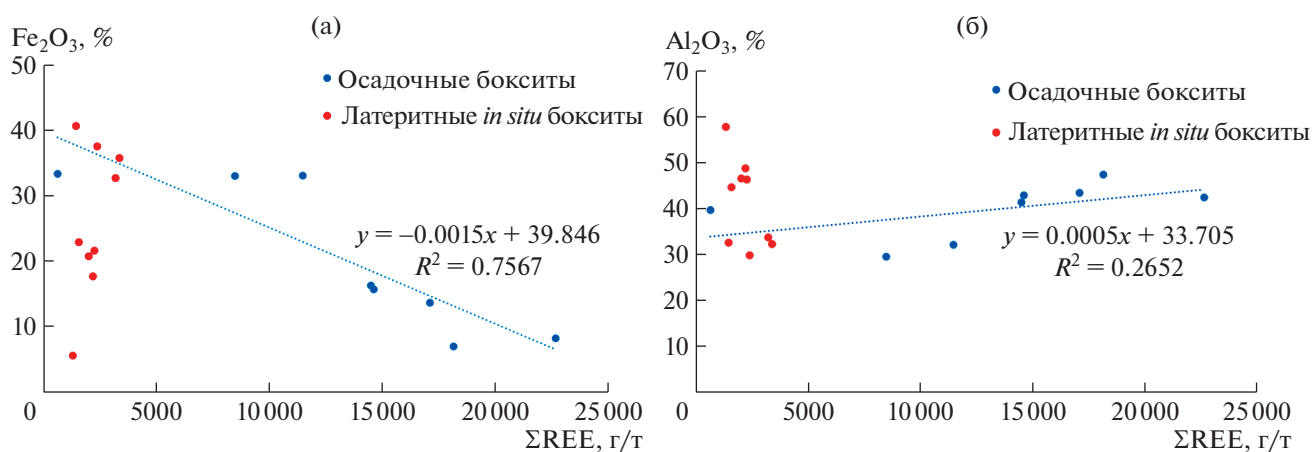


Рис. 6. Зависимость суммарного содержания РЗЭ от содержания железа (а) и алюминия (б) в латеритных и латеритно-осадочных бокситах.

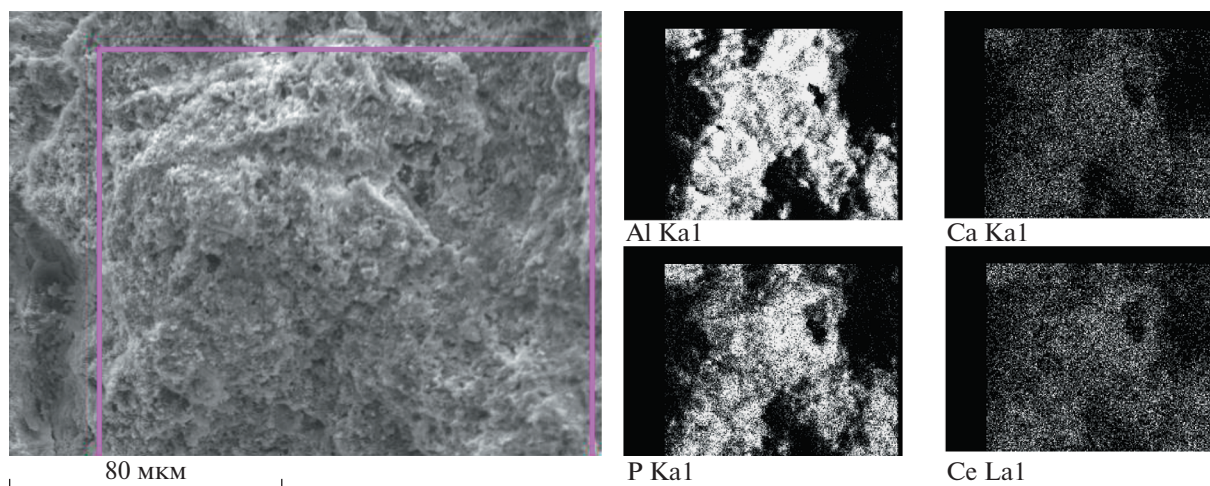


Рис. 7. Распределение РЗЭ в крандаллите. ЭДС состава. СЭМ.

дисперсными глинистыми пленками и мельчайшими зернами различных минералов.

Таким образом, подтвердилось наличие двух различных по генезису типов бокситов – латеритных остаточных *in situ* и осадочно-латеритных. В процессе латеритизации, при активном участии биоты, под действием инфильтрационных растворов происходило обогащение бокситов *in situ*, пронизанных дайками карбонатитов, редкоземельными элементами, которые были сорбированы образовавшимися биопленками. Типоморфным признаком осадочно-латеритных бокситов, помимо конкреционных, бобовых, пизолитовых, оолитовых текстур, является присутствие значительно большего количества РЗЭ по сравнению с латеритными бокситами. Также в них обнаружены минералы РЗЭ – монацит, крандаллит и церианит. Гипергенные минералы редких земель, находившиеся в латеритах в виде рыхлых дисперсных скоплений, при денудации были рассеяны в осадочных бокситах, их локальные концентрации стали меньше, но в целом они обогатили их. Источником этих образований являются карбонатиты, с которыми связано ниобий-редкометальное месторождение Чуктукон.

Полученные результаты детального изучения распределения РЗЭ, присутствующих в бокситовых рудах различного типа, могут иметь прикладное значение в выборе наиболее рациональных методов обогащения низкокачественных бокситов, в подготовке схемы попутного извлечения РЗЭ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 (соглашение 075-15-2020-802).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ключарев Д.С.* К вопросу о редкоземельной составляющей бокситов республики Коми /в сборнике: Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России. Материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. 2019. С. 189–192.
2. *Zhiwei Bao, Zhenhua Zhao.* Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China // *Ore Geology Reviews*. 2008. V. 33. P. 519–535. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.03.005>
3. *Zaihui Li, Jun Din, Jinsha Xu et al.* Discovery of the REE minerals in the Wulong–Nanchuan bauxite deposits, Chongqing, China: Insights on conditions of formation and processes // *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. V. 33. P. 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.06.016>
4. *Torró L., Proenza J.A., Aiglsperger T. et al.* Geological, geochemical and mineralogical characteristics of REE-bearing Las Mercedes bauxite deposit, Dominican Republic // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 89. P. 114–131. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.017>
5. *Ye L., Cheng Z.T., Pan Z.P.* The REE geochemical characteristics of the Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou // *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*. 2007. № 26. P. 228–233.
6. *Yang J.C., Wang F.L., Li D.S., Fei Y.C., Wang L.* Investigation on occurrence and trend of rare and rare-earth elements associated in bauxite // *Mining and Metallurgy*. 2004. № 13. P. 89–92.
7. *Zhang C., Xiao L.S.* Feasibility study of direct extraction of rare earth from bauxite in a mine // *Rare Metals and Cemented Carbides*. 2005. № 33. P. 8–10.
8. *Mongelli G.* Ce-anomalies in the textural components of Upper Cretaceous karst bauxites from the Apulian carbonate platform (southern Italy) // *Chemical Geology*. 1997. № 140. P. 69–79.
9. *Mordberg L.E.* Geochemical evolution of a Devonian diasporite–crandallite–svanbergite-bearing weathering profile in the Middle Timan, Russia // *Journal of Geochemical Exploration*. 1999. № 66. P. 353–361.
10. *Horbe A., Costa M.* Geochemical evolution of a lateritic Sn–Zr–Th–Nb–Y–REE-bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitinga, Amazonas–Brazil // *Journal of Geochemical Exploration*. 1999. V. 66. P. 339–351.
11. *Mordberg L.E., Stanley C.J., Germann K.* Rare earth element anomalies in crandallite group minerals from the Schugorsk bauxite deposit, Timan, Russia // *European Journal of Mineralogy*. 2000. V. 12. P. 1229–1243.
12. *Laskou M., Andreou G.* Rare earth elements distribution and REE-minerals from the Parnassos–Ghiona bauxite deposits, Greece // In: Eliopoulos D., et al. (Ed.), *Mineral Exploration and Sustainable Development, 7th Biennial SGA Meeting, Athens*. 2003. Mill Press, Rotterdam, pp. 89–92.
13. *Mameli P., Mongelli G., Oggiano G., Dinelli E.* Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (Western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity // *International Journal of Earth Sciences*. 2007. V. 96. P. 887–902.
14. *Боева Н.И., Слукин А.Д., Шупилова Е.С. и др.* Редкие и редкоземельные элементы в латеритизированных бокситах Чадобецкого поднятия (Сибирская платформа) // *ДАН. Науки о земле*, 2021, том 500, № 1. С. 17–25.
15. *Слукин А.Д.* Коры выветривания и бокситы Чадобецкого поднятия. М.: Наука, 1973. 127 с.
16. *Бычкова Я.В., Сеницын М.Ю., Петренко Д.Б., Николаева И.Ю., Бугаев И.А., Бычков А.Ю.* Методические особенности многоэлементного анализа горных пород методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // *Вестник Московского университета*. 2016. Серия 4: Геология. № 6. С. 56–63.
17. *Забиров Ю.А., Чеха В.П.* Первые бокситопоявления и перспективы Северо-Сибирской бокситоносной провинции // *Литоология и полезные ископаемые*. 1978. № 2. С. 31–39.

18. *Пельтек Е.И.* Типы месторождений бокситов Сибирской платформы и некоторые особенности их формирования и размещения / Проблемы бокситов Сибири // Труды СНИИГГиМС. КГУ. 1967. Вып. 58. С. 3–18.
19. *Шубистов Б.В.* Латериты и континентальные бокситы. Красноярск, 2000. 204 с.
20. *Freund F.* Kaolinite-metakaolinite, a model of a solid with extremely high lattice defect concentration // Deut. Keram. Ges. 1967. V. 44. P. 5–13.

TWO GENETIC TYPES OF BOXITES FROM THE CENTRAL DEPOSIT AND THEIR RARE METAL MINERALIZATION (SIBERIAN PLATFORM)

**N. M. Boeva^{a,#}, M. A. Makarova^a, E. S. Shipilova^a, A. D. Slukin^a, F. P. Melnikov^a,
O. V. Karimova^a, and Academician of RAS N. S. Bortnikov^a**

^a *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: boeva@igem.ru*

The central bauxite deposit on the territory of the Russian Federation is a unique geological object. It contains both original, lateritic bauxites, and products of their redeposition, sedimentary bauxites. Comparative characterization of residual lateritic bauxites in situ and laterite-sedimentary formations, study of the morphology of ore-forming bauxite minerals and their composition made it possible to reconstruct the genesis of lateritic profiles and sedimentary bauxite-bearing deposits as reliably as possible, which is of universal importance for the knowledge of such supergene minerals. On the example of the Centralnoye deposit of the Chadobets uplift, the prospect of using bauxites for the associated extraction of REE during their production is shown.

Keywords: bauxite, lateritic weathering crust, gibbsite, rare and rare earth elements