

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.21

РЕДКИЕ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
В ЛАТЕРИТИЗИРОВАННЫХ БОКСИТАХ ЧАДОБЕЦКОГО ПОДНЯТИЯ
(СИБИРСКАЯ ПЛАТФОРМА)

© 2021 г. Н. М. Боева^{1,*}, А. Д. Слукин¹, Е. С. Шипилова¹, М. А. Макарова¹, Ф. В. Балашов¹,
Е. А. Жегалло², Л. В. Зайцева², академик РАН Н. С. Бортников¹

Поступило 24.03.2021 г.

После доработки 26.05.2021 г.

Принято к публикации 27.05.2021 г.

Минеральный и химический состав бокситов Чадобецкого поднятия Сибирской платформы является суммарным продуктом латеритов на алюмосиликатных породах (источник алюминия) и на щелочных породах и карбонатах (источник редкоземельных элементов, Nb, Ta, Th, U и др.). Латеритизация этих пород и последующая денудация привели к образованию уникальных месторождений бокситов с высоким содержанием редких и редкоземельных элементов. Гипергенные минералы латеритных кор выветривания находятся в дисперсном микрокристаллическом и аморфном состоянии, что затрудняет их изучение и выбор способов извлечения полезных компонентов. Прецизионными методами были установлены формы, составы главных гипергенных минералов, биоминеральных пленок, биоморфоз, распределение в них редких и редкоземельных элементов.

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

DOI: 10.31857/S2686739721090036

ВВЕДЕНИЕ

Латеритные коры выветривания (ЛКВ) являются источниками месторождений многих полезных ископаемых: железа, марганца, золота, бокситов, редких и редкоземельных элементов (РЗЭ). Латериты – продукты высшей степени выветривания – характеризуются полной (или почти полной) потерей кремния, щелочных и щелочноземельных элементов и относительным остаточным накоплением элементов-гидролизатов: Al, Fe, Mn, Th и др., оксидов и фосфатов. Кроме того, в процессе образования латеритов слагающие их минералы непрерывно проходят стадии возникновения коллоидов и сорбции химических элементов как из просачивающихся вниз растворов, так и из растворов, поднимающихся при эвапотранспирации из нижних зон коры выветривания КВ. Таким образом, они обогащаются вышеперечисленными элементами, а также в них многократно увеличивается содержание Ti, Th, U, Pb, Zn, REE, Y, Ba, Sr, Co, Ni и др.

Месторождения редкометалльных КВ хорошо изучены [1–4]. Редкие и РЗЭ использовались в качестве показателя для определения природы материнской породы и химических процессов при изменении профиля в результате выветривания, связи их с гипергенными минералами [5–8]. Изучение поведения РЗЭ в бокситах КМА позволило уточнить зональность КВ и оценить степень преобразований, связанных с наложенными процессами [9]. В хлоритовых сланцах на юге Камеруна обогащение РЗЭ в основании залежей бокситов объясняется увеличением pH вокруг материнской породы, а также присутствием минеральных лигандов во время бокситизации [10].

Нашей целью является исследование редкометалльных и РЗЭ в бокситах Чадобецкого поднятия. Бокситы Центрального месторождения образовались по кварц-мусковит-полевошпатовым сланцам, пронизанным комплексом щелочных ультраосновных пород, в том числе в виде карбонатитовых тел различной морфологии. Карбонатиты Чадобецкого поднятия имеют промышленные концентрации редких и РЗЭ [4]. В процессе латеритизации в бокситах, представляющих собой алюминийное сырье не самого высокого качества, образовались уникально высокие концентрации титана, редких и РЗЭ, фосфора и стронция, что позволяет рассматривать их как комплексное сырье. При правильно подобранной схеме обогащения

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

² Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: boeva@igem.ru

ния, месторождения данного типа могут быть высококоррелируемыми. Представляется, что полученные результаты детального изучения морфологии и состава гипергенных минералов редких и РЗЭ, присутствующих в бокситовых рудах, будут иметь прикладное значение в выборе наиболее рациональных методов обогащения низкокачественных бокситов, в подготовке схемы попутного извлечения полезных компонентов (Fe, Ti, Ga, V), в том числе микроэлементов (REE, Y, Ba, P, U, Th, Nb, Ta). Завершение строительства железной дороги Карабула-Ярки, ввод в эксплуатацию построенного в 120 км от него Богучанского алюминиевого завода, недавно открытая Богучанская ГЭС являются предпосылками для решения проблемы освоения и предполагают начало эксплуатации этих месторождений.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ЧАДОБЕЦКОГО ПОДНЯТИЯ

Чадобецкое поднятие находится в юго-западной части Сибирской платформы на междуречье Ангары и Подкаменной Тунгуски. Оно представляет собой брахиантиклинальную структуру с размерами осей 46 и 35 км. Ее осложняют два выступа-ядра: северный с месторождением Центральным и южный с Чуктуконом. Они сложены докембрийскими отложениями, прорванными щелочными ультраосновными породами в виде штоков, даек, силлов, кимберлитовых трубок и тел карбонатитов [4].

В меловом периоде в условиях тропического жаркого переменного-влажного климата на Сибирской платформе протекали процессы латеритизации. Их продукты сохранились в виде многочисленных, частично размытых ЛКВ на траппах и ассоциирующихся с ними мелких осадочных месторождений бокситов. На Центральном месторождении бокситов в КВ имеются проявления железомарганцевых охр по карбонатитам и мощные (8.5 м) останцы гиббситовых бокситов по сланцам. Последние по своим текстурно-структурным особенностям, минеральному и химическому составу главных породообразующих компонентов идентичны латеритным бокситам на подобных породах Индии, Австралии и Гвинеи [11–14]. Центральное месторождение, сложенное бобово-обломочными бокситами, находится в эрозионных депрессиях на поверхности северного купола. В обломках находятся псевдоморфные латериты по всем подстилающим породам.

Псевдоморфные бокситы Центрального месторождения и присутствие гиббсита в латеритизированных карбонатитах Теринского и Чуктуконского выступов Чадобецкого поднятия являются надежными индикаторами того, что они представляют собой продукты единого процесса выветривания.

Было установлено, что латеритные бокситы, образованные по кварц-мусковит-полевошпатовым сланцам, состоят из гиббсита (до 62 мас. % Al_2O_3), бемита, корунда, гетита, гематита, маггемита, анатаза, каолинита, кварца. Латериты по щелочным ультрабазитам содержат 3–13 мас. % Al_2O_3 и до 32 мас. % TiO_2 в форме псевдоморфоз гипергенного анатаза по октаэдрическому кристаллам перовскита. Латериты по карбонатитам сложены Fe-Mn-охрами с обильными гнездами порошковатого гипергенного монацита с содержанием лантаноидов до 14.4 мас. %. На южном куполе преобладают КВ карбонатитов с монацитом, рабдофаном, черчитом, флоренситом и вторичным, гипергенным пироксеном (-Ce, -Y, -Sr и -Ba). Денудация этих латеритов привела к образованию уникальных месторождений осадочных бокситов с высоким содержанием РЗЭ, Sr, Ba, P, U, Th и Ti. По краям поднятия распространены известняки верхнего кембрия, где в карстовых депрессиях залегают переотложенные латеритизированные долериты (месторождения Пуны, Ибд-жибдек, Верхне-Теринское и другие). Обломки латеритов состоят из гиббсита, местами с примесью нордстрандита. Бобовые бокситы сложены гиббситом с примесью бемита, диаспора, корунда и нордстрандита. На Чуктуконе выветривание достигло высшей стадии, вплоть до полного выноса Si, Ca, Mg, Na и K [1, 11].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились с помощью сканирующих (СЭМ) CamScan 4 (“Cambridge”) и TESCAN VEGA IXMU (“Tescan”) микроскопов с энергодисперсионной приставкой (ЭДС). Синхронный термический анализ (СТА) выполнялся на приборе (STA 449 F1 Jupiter “Netzsch”). Съемка производилась со скоростью $10^\circ/\text{мин}$ в атмосфере Ar в тигельках с закрытыми крышками до температуры 1050°C . Масса навески составляла ~40 мг. Химический состав бокситов определен с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Axios “RANalytical”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным РФА (табл. 1), содержание SiO_2 в бокситах изменяется от 1.11 до 9.55 мас. %. Содержание TiO_2 варьирует в широких пределах – от 3 до 10 мас. %, Al_2O_3 от 27.19 до 49.73 мас. %, Fe_2O_3 от 0.84 до 45.82 мас. %, Na_2O и K_2O находятся в примерно одинаковых диапазонах от 0.02 до 0.1 мас. %, P_2O_5 от 0.49 до 15.5 мас. %.

В бокситах выявлены гнезда и слойки различных минералов с повышенным содержанием РЗЭ и редких металлов, изученных нами с помощью электронных микроскопов, которые позволили

Таблица 1. Химический состав (мас. %) бокситов, Центральное

Компонент	Бокситы									
	2152	2150	2147	2145	2143	1530	2382	2381	1535	1411
SiO ₂	2.68	3.76	2.05	2.63	1.35	9.55	0.78	1.11	1.86	2.28
TiO ₂	8.1	8.29	8.86	9.58	9.42	10	5.64	3	9.24	7.31
Al ₂ O ₃	49.73	40.18	36.75	43	45.62	38.78	38.36	33.89	31.96	27.19
Fe ₂ O ₃	10.89	7.21	24.94	18.18	13.56	0.86	28.19	40.58	35.26	40.1
FeO	нет	нет	нет	нет	нет	1.54	не опр.	не опр.	3.16	0.22
MnO	не опр.	нет	0.21	0.07	не опр.	0.32				
MgO	0.28	0.44	0.42	0.28	0.29	0.71	0.3	не опр.	0	0.68
CaO	нет	2.94	0.5	0.3	0.42	0.83	0.28	не опр.	0.34	0.68
Na ₂ O	0.05	0.07	0.05	0.04	0.04	0.06	не опр.	0.07	0.1	0.2
K ₂ O	0.03	0.05	0.02	0.02	0.02	0.07	не опр.	не опр.	0.03	0.06
BaO	нет	2.42	0.42	нет	нет	1.68	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.
SO ₃	нет	0.66	0.22	нет	не опр.	0.87	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.
K ₂ O ₃	0.08	0.09	0.13	0.11	0.13	не опр.				
P ₂ O ₅	3.28	15.5	2.39	2.34	2.32	6.96	0.91	0.49	1.17	0.5
TR ₂ O ₃	2.27	1.13	1.13	2.22	2.12	2.05	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.
CO ₂	0.89	0.46	1.16	0.58	нет	0.43	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.
ППП	21.45	16.94	20.69	21.33	24.67	21.84	24.11	20.64	17.04	20.22
Сумма	100.18	100.14	99.73	100.44	99.96	100.18	98.78	100.25	100.41	99.85

увидеть морфологию кристаллов большинства минералов и обосновать их генезис.

Крандаллит CaAl₃[PO₄]₂(OH)₅ · H₂O обнаружен в прожилках и гнездах размером 2 × 3 см на границе латеритизированных карбонатов и кварц-мусковит-полевошпатовых сланцев. Несомненно, его генезис обусловлен наличием обильных источников Al из латеритизированных алюмосиликатов, слагающих сланцы, а также Ca и P, освобождающихся при выветривании апатита и карбонатов. Кроме того, крандаллит часто содержит Ce (до 0.08 мас. %) и сопровождается другими минералами той же группы алунита, в которых катионы представлены Ba (горсейсит), Sr (гойяцит) и Pb (плюмбогуммит). Крандаллит имеет вид белых прозрачных радиально-лучистых агрегатов, состоящих из тонких пластинок, покрытых искрящимися пирамидальными кристалликами (рис. 26). Этот минерал диагностирован с помощью СТА. На кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) наблюдается три эндотермических эффекта с максимумами при 349, 457.5 и 527.7°C, связанных с дегидроксидизацией крандаллита. При этом потеря массы составляет 13.64%. Потеря гидроксильных групп сопровождается разрушением структуры минерала. Экзотермический эффект с максимальной температурой 834.7°C связан с его рекристалли-

зацией. Эндотермический эффект с максимумами при температуре 886 и 920.6°C отражает диссоциацию карбоната (рис. 26).

Пирохлор (Na, Ca...)₂(Nb, Ti...)₂O₆[OH, F] присутствует в латеритах в виде октаэдрических кристаллов размером до 90 мкм, их двойников и сростков с другими минералами (рис. 3а). В полированных шлифах видно, что кристаллы пирохлора полые, многие из них имеют зональное строение и трещиноваты. Трещины в кристаллах пирохлора заполнены гетитом и другими минералами. Химический состав первичного и вторичного пирохлора меняется в широком диапазоне. Максимальное содержания Nb₂O₅ наблюдаются в первичном пирохлоре – 72.02 мас. %, минимальное соответствует вторичному пирохлору – 58.97 мас. %. Содержание TiO₂ в пирохлоре увеличивается в процессе латеритизации. Во вторичных кристаллах пирохлора CeO₂ варьирует от 1.86 до 20.13 мас. %. La₂O₃ обнаружен также во вторичных минералах – от 0.04 до 4.67 мас. %. Содержание Sr₂O₃ во вторичных кристаллах пирохлора составляет от 0.08 до 0.84 мас. %. Fe₂O₃ достигает максимума – 2.57 мас. % и минимума – 0.12 мас. %. Максимальное значение CaO наблюдается в первичных кристаллах пирохлора – 20.01 мас. %, а минимальное – во вторичных – 0.13 мас. %.



Рис. 1. Схема геологического строения Чадобецкого поднятия со снятыми верхнепалеогеновыми и альб-эоценовыми отложениями: 1 – нижнетриасовые образования; 2 – средне-верхнекаменноугольные отложения; 3 – средне-верхнекембрийские отложения; 4 – нижнекембрийские карбонатные породы; 5 – верхнепротерозойские отложения свиты: 5 – тогонская, 6 – безымянная, 7 – медвековская, 8 – бруская, 9 – карбонатно-терригенные териновской, чуктуконской и долычиковской свит, 10 – семеновская; 11 – траппы; 12 – щелочные ультраосновные породы и карбонаты Чадобецкого комплекса: а – трубка взрыва, б – штокообразные тела, в – силлы; 13 – геологические границы; 14 – тектонические нарушения [1, 4].

В процессе выветривания Na и Ca были вынесены и замещены Ce, La, Pr, Nd, Y, Ba, Sr, в результате чего образовались гипергенные кристаллы пирохлора с преимущественной фиксацией LREE: Ce (пирохлор-Ce), Sr (пирохлор-Sr), Ba (пирохлор-Ba), Y (пирохлор-Y), суммарное количество которых доходит до 20–25 мас. % (табл. 2, рис. 3б), а также их разновидности смешанного состава, соотношение которых показано на трехкомпонентной диаграмме (рис. 3б). Вторичный пирохлор полностью сохраняет облик первичных кристаллов, но становится пористым и рыхлым (рис. 3в).

На кривой ДСК при нагревании минерала наблюдается один эндоэффект, в температурном интервале 100–300°C, отвечающий за его дегидратацию, и два экзоэффекта (300–400 и 400–500°C), связанных с переходом из метамиктного в кристаллическое состояние. Из-за непостоянного состава пирохлора температуры максимумов в этих интервалах варьируют.

Подобные преобразования пирохлора исследованы и на месторождении Томтор [15, 16], где предполагается участие гидротермальных процессов. Не отрицая такой возможности на Томторе, отметим, что на Чуктуконе и Центральном, эти преобразования являются результатом исключительно гипергенных процессов в условиях климата “латерита” [17], что подтверждается сохранностью анхимономинеральных псевдоморфных латеритных бокситов по кварц-мусковит-полевошпатовым и другим сланцам.

Биопленки в ЛКВ образуются в условиях обильного водообмена и массового развития биоты. В биопленке, обволакивающей кристалл гиббсита, в составе которой преобладает Al, присутствуют примеси Fe и Ce (рис. 4а). В результате процесса латеритизации возникают биомине-

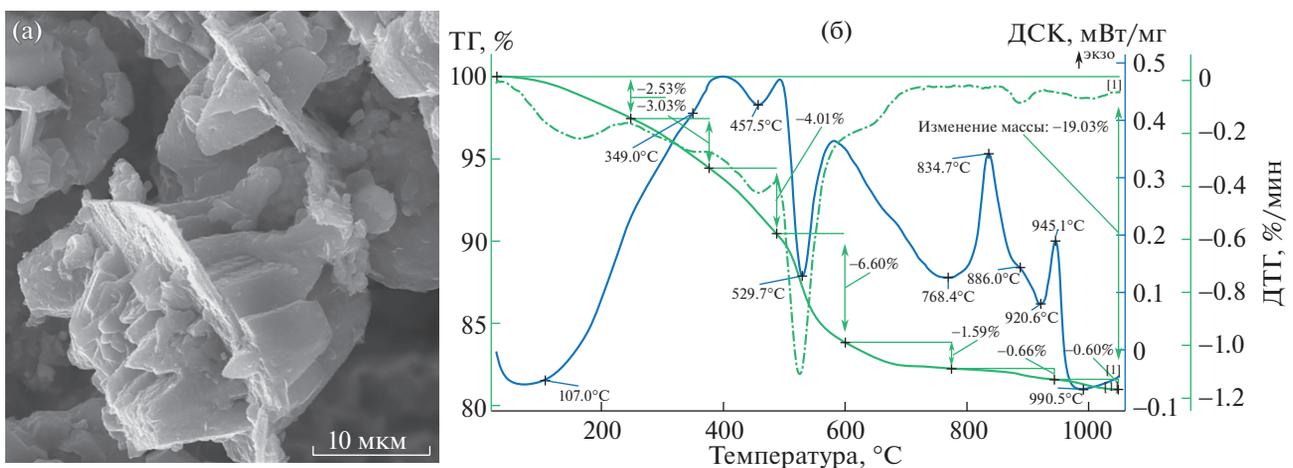


Рис. 2. Крандаллит (а), СЭМ, кривые термического анализа (б).

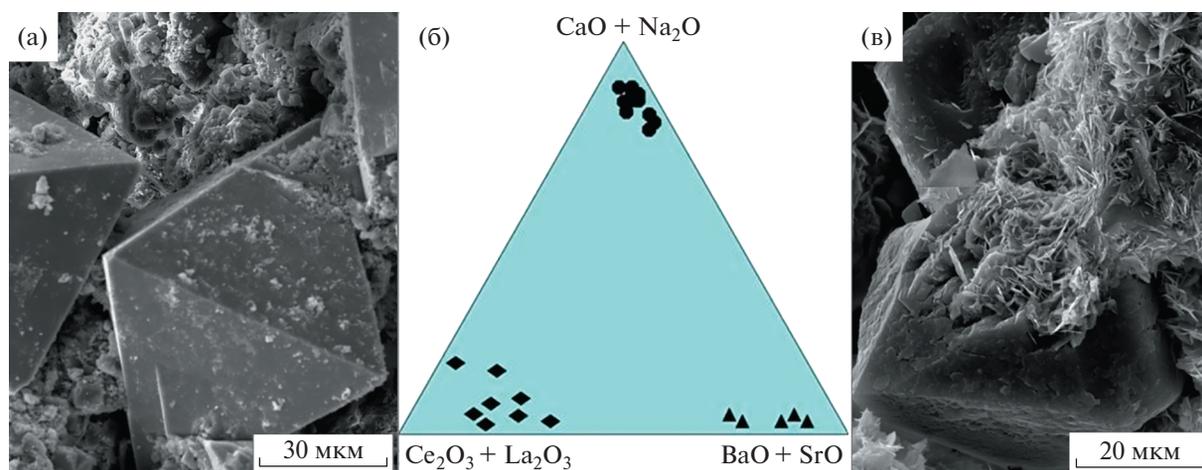


Рис. 3. Пирохлор первичный (а), диаграмма состава пирохлора (б), пирохлор из бокситов (в). СЭМ.

ральные пленки, состоящие из С, F, P, Ca, Mn, Fe, La, Ce, Nd (рис. 4б).

По пленкам образуются скопления микрокристаллического вещества с примесью сферических тел размером 0.5–1.2 мкм (рис. 5). В его составе преобладают P, Ce, La, Nd, общее содержание РЗЭ в породе достигает 14.7 мас. %.

Псиломелан $(\text{Ba}, \text{H}_2\text{O})_2\text{Mn}_5\text{O}_{10}$ находится в осадочных бокситах в виде рассеянных охристых зерен, натеков, подобных “черной стеклянной голове” и их обломков (рис. 6а). На свежих сколах видно их ритмично-полосчатое строение (рис. 6б). Минерал состоит из гидроксида марганца с типичными примесями K, Ca, Zn и Ba (рис. 6б). Со-

став слоев отличается друг от друга, местами они чередуются с гиббситом, встречаются локальные участки, обогащенные сорбированным на поверхности церием. На кривой ДСК наблюдается три эндозффекта с максимумами при 120, 620 и 780°C, связанных с последовательным удалением гидроксильных групп при нагревании. Псиломелан может служить индикатором при поисках месторождений РЗЭ.

Гетит FeOОН обнаружил многообразие форм: от гладких и смятых биопленок, покрытых биоморфозами до сноповидных (рис. 7а), крестообразных, радиально-лучистых и игльчатых кристаллов (рис. 7б). Между кристаллами гетита

Таблица 2. Химический состав пирохлора

Химический состав (мас. %) кристаллов пирохлора								
	63/1	63/2	94/5	17	50	94/3	95/6	95/8
	Первичный пирохлор		Вторичный пирохлор					
Nb ₂ O ₅	69.01	72.02	63.02	69.9	68.71	58.97	68.09	66.13
TiO ₂	7.44	4.62	9.43	0.47	5.44	7.48	4.55	6.77
CeO ₂	нет	нет	12.35	1.86	5.67	20.13	17.01	15.48
La ₂ O ₃	нет	нет	0.04	не опр.	не опр.	0.61	2.7	4.67
Y ₂ O ₃	0.69	2	0.91	не опр.	не опр.	нет	1.62	1.85
Cr ₂ O ₃	нет	нет	0.09	не опр.	не опр.	0.84	0.33	0.08
Fe ₂ O ₃	0.44	0.4	0.79	0.12	0.91	2.57	0.65	0.76
CaO	20.01	17.58	2.56	0.13	0.52	4.75	0.45	0.32
MgO	0.02	нет	0.39	не опр.	не опр.	0.001	0.07	нет
SrO	1.03	1.83	0.81	2.17	13.02	0.07	4.53	3.93
BaO	нет	нет	9.18	18.24	5.46	4.44	не опр.	не опр.
Na ₂ O	1.34	1.15	нет	нет	нет	0.11	нет	нет
Сумма	99.98	99.6	99.57	92.89	99.73	99.98	100	99.99

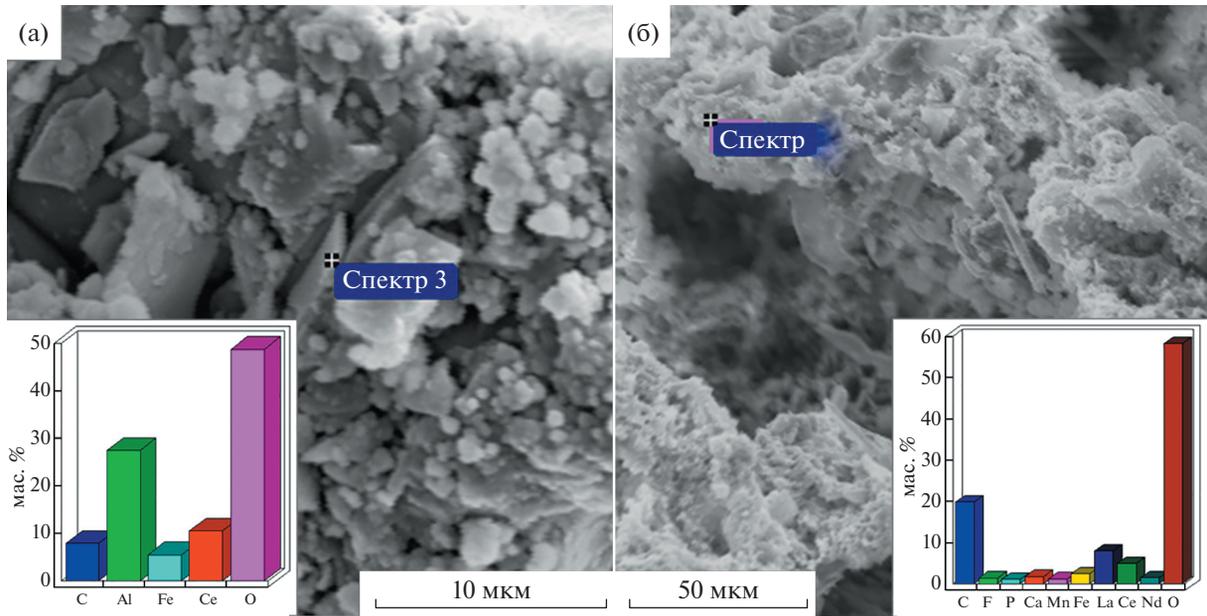


Рис. 4. Био пленки: (а) по гиббситу, (б) на стенке каверны в ЛКВ. На врезках ЭДС состава. СЭМ.

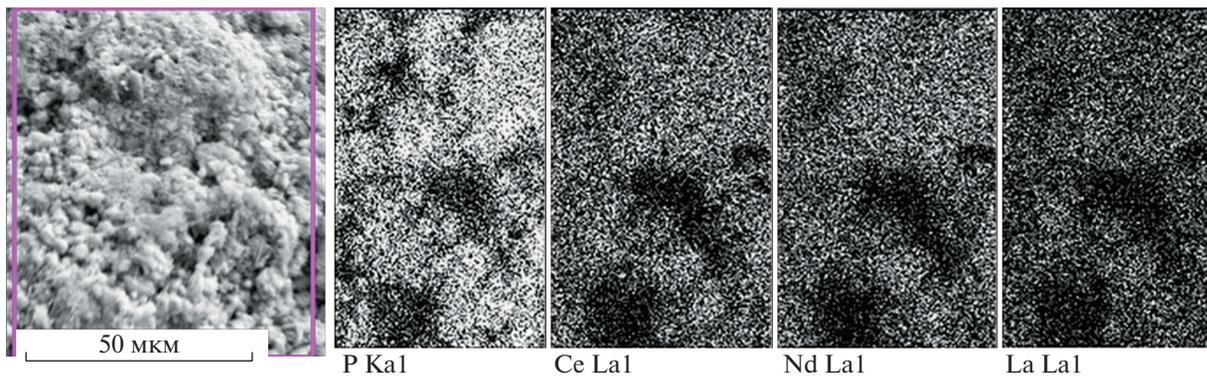


Рис. 5. Микрoкристаллическое вещество, распределение РЗЭ. ЭДС состава. СЭМ.

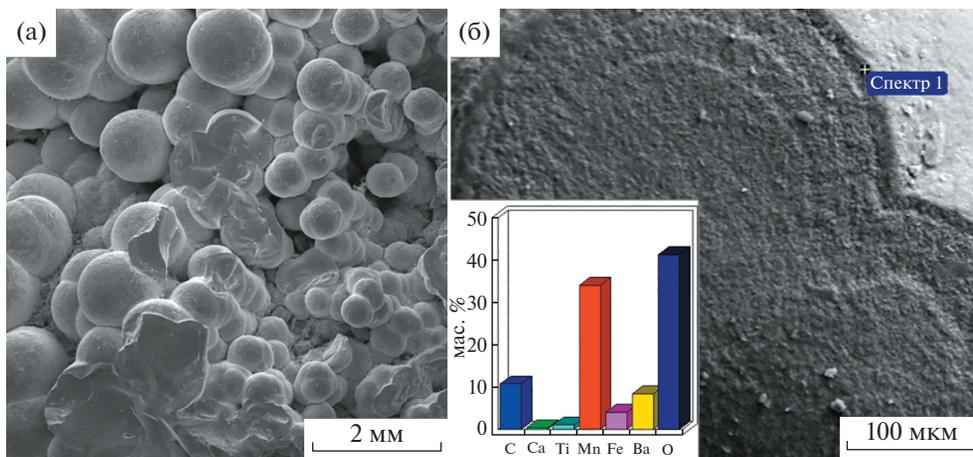


Рис. 6. Псиломелан. На врезках ЭДС состава. СЭМ.

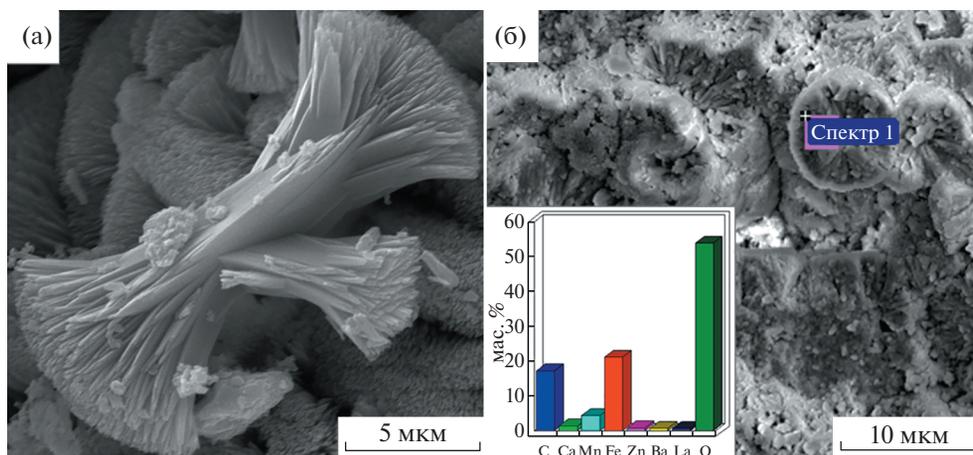


Рис. 7. Гетит в бокситах. На врезке ЭДС состава. СЭМ.

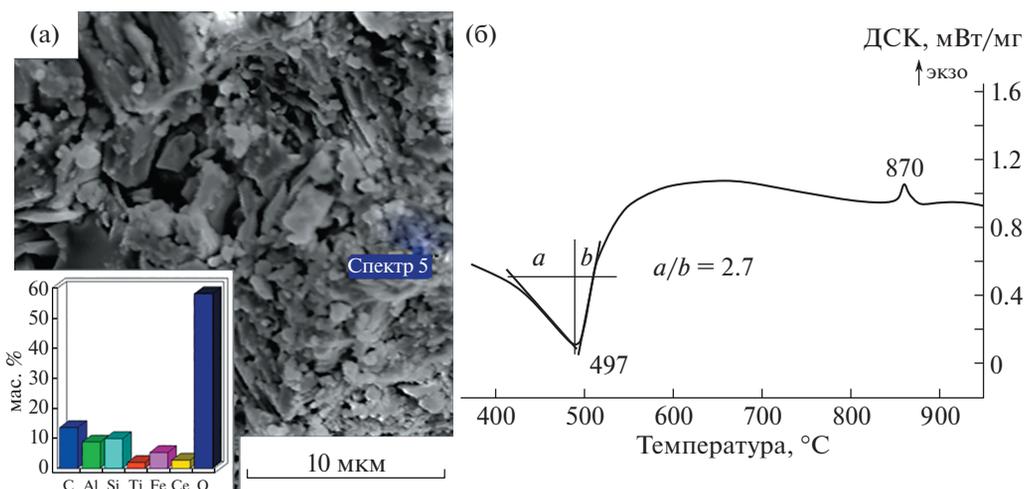


Рис. 8. Каолинит и его ЭДС состава (а), СЭМ, кривая ДСК каолинита (б).

по микротрещинам концентрируются в виде биопленок следующие элементы: Ca, Mn, Zn, Ba, La. В бокситах, даже маложелезистых, кристаллы гиббсита усеяны единичными или многочисленными идиоморфными пластинчатыми кристаллами размером до 0,8–0,4 мкм. Гетит не является концентратором редких земель, но тонкодисперсные охры механически включают редкоземельные минералы и общее содержание РЗЭ при этом достигает 10–20 мас. %.

Каолинит $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ в бокситах спорадически рассеян в виде отдельных чешуек и реликтов червеобразных сростков с несовершенной структурой (рис. 8а). Чем больше корродированна поверхность кристаллов, тем больше он сорбирует химических элементов из окружающего пространства (рис. 8б, врезка). На кривой ДСК в температурном интервале 400–600°C с максимумом при 497°C происходит дегидроксилизация каоли-

нита. Индекс асимметрии составляет 2,7, что соответствует весьма несовершенной структуре минерала (рис. 8в) [18]. Экзотермический эффект незначительный и его пик приходится на температуру 870°C, что подтверждает разупорядоченность в структуре каолинита [19]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Месторождения бокситов Российской Федерации в силу климатических условий формирования немногочисленны и характеризуются относительно низким содержанием полезных компонентов. Месторождения бокситов Чадобецкой группы приняты на государственный баланс только как алюминиевое сырье с попутным извлечением галлия и ванадия [20]. Установленные нами в бокситах Центрального месторождения высокие концентрации редких металлов и РЗЭ

позволяют рассматривать их как комплексное минеральное сырье. Изучение геологического строения месторождения, морфологии рудообразующих минералов бокситов и их состава дало возможность обосновать их генезис и определить источники рудного вещества. Бокситы являются суммарным продуктом латеритного выветривания всех горных пород, слагающих северный купол Чадобецкого поднятия, их частичной денудации и аккумуляции в эрозионных депрессиях. Выявленные формы редких металлов и минералов РЗЭ характеризуют их гипергенную природу, их хрупкость и дисперсность затрудняют механическое извлечение полезных компонентов, заставляет отдать предпочтение гидрометаллургическим методам передела руд. Источником редких и РЗЭ являются карбонатиты, с которыми связано ниобий-редкометальное месторождение Чуктукон. Латеритизация этих пород совместно с кварц-мусковит-полевошпатовыми сланцами и последующая денудация и привели к образованию уникальных месторождений бокситов с высоким содержанием REE, Ti, Sr, Ba, P, U, Th.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, грант № 075-15-2020-802, аналитические исследования проведены в ЦКП “ИГЕМ АНАЛИТИКА”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лапин А.В., Толстов А.В.* Месторождения кор выветривания карбонатитов. М.: Наука, 1995. 208 с.
2. *Лапин А.В., Куликова И.М., Левченко Е.Н.* Апатит-пироклоровые метасоматиты экзоконтактного ореола карбонатитов – перспективный тип фосфатно-редкометалльных руд месторождения Чуктукон на Чадобецком поднятии // Новые данные по минералогии и геохимии редкометалльных месторождений. М.: ИМГРЭ, 2017. С. 102–114.
3. *Кузьмин В.И., Кузьмин Д.В., Жижаев А.М.* Изучение вещественного состава и технологических свойств редкометалльных руд Чуктуконского месторождения // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2013. № 3. С. 303–312.
4. *Слукин А.Д.* Коры выветривания и бокситы Чадобецкого поднятия. М.: Наука, 1973. 127 с.
5. *Monsels D.A.* Bauxite Formation on Tertiary Sediments and Proterozoic Bedrock in Suriname // Utrecht Studies in Earth Sciences: 147. 2018. 178 p.
6. *Wang X., Jiao Y., Du Y., et al.* REE Mobility and Ce Anomaly in Bauxite Deposit of WZD Area, Northern Guizhou, China. // Journal of Geochemical Exploration. 2013. V. 133. P. 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.009>
7. *Braun J.J., Page M., Herbillin A., Rosin C.* Mobilization and Redistribution of REEs and Thorium in a Syenitic Lateritic Profile: A Mass Balance Study // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. V. 57. Iss. 18. P. 4419–4434. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90492-F](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90492-F)
8. *Mordberg L.E., Stanley C.J., Germann K.* Mineralogy and Geochemistry of Trace Elements in Bauxites: The Devonian Schugorsk Deposit, Russia // Mineralogical Magazine. 2001. V. 65. № 1. P. 81–101.
9. *Сиротин В.И., Шатров В.А., Войцеховский Г.В. и др.* Редкие и редкоземельные элементы в корях выветривания Курской серии КМА // Литология и полезные ископаемые. 2005. № 3. С. 250–266.
10. *Onana V.L., Ntoulala R.F.D., Tangé S.N.* Major, Trace and REE Geochemistry in Contrasted Chlorite Schist Weathering Profiles from Southern Cameroon: Influence of the Nyong and Dja Rivers Water Table Fluctuations in Geochemical Evolution Processes // Journal of African Earth Sciences. 2016. V. 124. P. 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.026>
11. *Слукин А.Д., Бортников Н.С., Новиков В.М., Боева Н.М., Жухлистов А.П., Жегалло Е.А., Зайцева Л.В.* Формы нахождения и закономерности распределения Al, Ti, REE, Nb, U, и Th в месторождениях бокситов различного возраста / Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования. Мат. Всероссийской конф. М.: ИГЕМ РАН, 2015. С. 241–242.
12. *Mamedov V.I., Chausov A.A., Okonov E.A., Makarova M.A., Boeva N.M.* The World's Largest Fouta Djallon–Mandingo Bauxite Province (West Africa): Part I. Background // Geology of Ore Deposits. 2020. V. 56. № 2. P. 163–176. <https://doi.org/10.1134/S1075701520020026>
13. *Mamedov V.I., Makarova M.A., Boeva N.M., Slukin A.D., Shipilova E.S., Bortnikov N.S.* The Main Processes and Stages in the Formation of the Unique Sangaredi Deposit of Bauxites (West Africa) // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 492. №. 1. P. 291–296. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20050128>
14. *Slukin A.D., Bortnikov N.S., Zhegalov E.A., Zaytseva L.V., Zhukhlistov A.P., Mokhov A.V., Boeva N.M.* Biomineralization in Bauxitic Laterites of Modern- and Paleotropics of Earth // Biogenic - Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems / Editors: *Frank-Kamenetskaya O.V., Panova E.G., Vlasov D.Yu.* 2015. Springer. P. 67–75.
15. *Novikov V.M., Boeva N.M., Bortnikov N.S., Zhukhlistov A.P., Krupskaya V.V., Bushueva E.B.* Chai Mat Kaolin–Bauxite Deposit (South Vietnam): Typomorphic Features of Kaolinite and Formation Mechanism of the Zonal Profile of the Bauxite-Bearing Weathering crust of Granites // Geology of Ore Deposits. 2018. V. 60. № 6. P. 513–526. <https://doi.org/10.1134/S107570151806003X>
16. *Bortnikov N.S., Novikov V.M., Savko A.D., Boeva N.M., Zhegalov E.A., Bushueva E.B., Krainov A.V., Dmitriev D.A.* Structural-Morphological Features of Kaolinite from Clayey Rocks Subjected to Different Stages of Lithogenesis: Evidence from the Voronezh Antecline // Lithology and Mineral Resources. 2013. V. 48. № 5. P. 384–397.
17. *Добрецов Н.Л., Жмодик С.М., Лазарева Е.В., Брянская А.В., Пономарчук В.А., Сарыгоол Б.Ю., Кири-*

- ченко И.С., Толстов А.В., Карманов Н.С. Структурно-морфологические признаки участия микроорганизмов в формировании богатых Nb–REE-руд Томторского месторождения (Россия) // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 150–154.
18. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика, 2015. Т. 56. № 6. С. 1080–1115. <https://doi.org/10.15372/GIG20150603>
19. Сеницын В.М. Климат латерита и боксита. Л.: Недра, 1976. 152 с.
20. Шибистов Б.В. Бокситы и железоалюминиевые руды Нижнего Приангарья и проблемы их комплексного использования // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2013. Т. 8. № 6. С. 995–1002.

FEATURES OF MORPHOLOGY AND COMPOSITION OF SUPERGENIC MINERALS OF RARE AND RARE EARTH ELEMENTS IN LATERITIZED BAUXITES OF THE CHADOBETS UPLIFT (SIBERIAN PLATFORM)

N. M. Boeva^{a,*}, A. D. Slukin^a, E. S. Shipilova^a, M. A. Makarova^a, F. V. Balashov^a, E. A. Zhegallo^b, L. V. Zaytseva^b, and Academician of the RAS N. S. Bortnikov^a

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

^b *A.A. Borisyak Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

*E-mail: boeva@igem.ru

The mineral and chemical composition of the bauxites of the Chadobets uplift of the Siberian platform is the total product of laterites on aluminosilicate rocks (the source of aluminum) and on alkaline rocks and carbonitites (the source of REE, Nb, Ta, Th, U, etc.). Lateritization of these rocks and subsequent denudation led to the formation of unique deposits of bauxite with a high content of rare and REE. Supergene minerals of lateritic are in a dispersed microcrystalline and amorphous state, which makes it difficult to study them and choose extraction methods. The forms, compositions, and properties of the main supergene minerals, biomineral films, and biomorphoses were determined by precision methods.

Keywords: bauxite, laterite, gibbsite, rare and rare earth elements