

УДК 553.21

БОКСИТЫ ТАТАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ, РОССИЯ): ПЕРВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА КОНТАКТОВО-КАРСТОВОГО ГЕНЕЗИСА

© 2023 г. Н. М. Боева^{1,*}, А. Д. Слукин¹, М. А. Макарова¹, Е. С. Шипилова¹, Ф. П. Мельников¹,
Д. А. Внучков¹, Е. А. Жегалло², Л. В. Зайцева², академик РАН Н. С. Бортников¹

Поступило 15.07.2023 г.

После доработки 09.08.2023 г.

Принято к публикации 10.08.2023 г.

Татарское месторождение бокситов на территории РФ сформировалось в результате седиментации в контактово-карстовых депрессиях продуктов денудации латеритных кор выветривания амфиболитов. Детальные минералогические исследования бокситов дали возможность достоверно восстановить условия их образования. Как выяснилось, из-за близкого расположения областей питания и аккумуляции, происходила денудация как уже выветрелых, так и исходных пород. При этом в карстовых депрессиях продолжались химические процессы. Впервые для контактово-карстовых бокситов выявлено присутствие наночастиц аморфного оксида алюминия. Эта характерная особенность формы выделения глинозема связана с последующим прекращением процессов латеритизации и затуханием их с глубиной. Наличие аморфного моногидрата алюминия необходимо учитывать при подборе схемы обогащения бокситов.

Ключевые слова: боксит, контактово-карстовый, гиббсит, рентгеноаморфный моногидрат алюминия, редкие и редкоземельные элементы

DOI: 10.31857/S2686739723601825, **EDN:** LOLEZN

ВВЕДЕНИЕ

Бокситы известны как первичное сырье для алюминия и обычно образуются в результате интенсивного химического выветривания в жарких и влажных зонах. Запасы бокситов в мире достигают нескольких десятков миллиардов тонн. Россия — одна из немногих стран, импортирующих бокситы или глинозем для работы алюминиевых заводов. Потенциал Сибирского региона, связанный с высокоглиноземистыми породами, вновь привлек внимание исследователей из-за введенного в эксплуатацию Богучанского алюминиевого завода в Красноярском крае. Наряду с осадочно-латеритными бокситами [1, 2], несомненный интерес представляют карстовые депрессии, заполненные дефицитным бокситовым сырьем. По опубликованным сведениям, запасы бокситов Нижнего Приангарья оцениваются в 300 млн т сырья [3].

Общепризнанными считаются три основных генетических типа бокситов: латеритные бокситы, полученные в результате латеритизации *in situ* подстилающих алюмосиликатных пород; бокситы тихвинского типа, являющиеся продуктами размыва существовавших ранее латеритных бокситов и залегающие на эродированной поверхности алюмосиликатных пород; карстовые бокситы, развитые на эродированной поверхности карбонатных коренных пород. Д. Бардошши выделяет следующие типы карстовых бокситов: средиземноморский, тиманский, казахстанский, арьежский, салентинский и тульский [4]. Среди сибирских месторождений выделяются четыре морфогенетических типа залежей: котловинный, лентообразный и долинообразный, залежи сложных карстовых бассейнов, а также контактово-карстовый — овражный или каньонообразный [5]. Последний отличается исключительной глубиной (до 260 м), намного превышающий глубину классического карста средиземноморского типа. Месторождения региона ближе всего к казахстанскому типу, характеризующемуся тем, что карбонатная подошва перекрывается бокситоносной толщей, имеющей литологически разное, но генетически единое строение.

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

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

*E-mail: boeva@igem.ru

Бокситовые руды карстового типа обычно обогащены многими экономически важными (критическими) элементами, такими как V, Cr, Co, Ni, Nb, REE [6]. Поэтому неудивительно, что литература по месторождениям бокситов была сосредоточена на генетических механизмах, способствующих образованию этого типа осадочных пород [6, 7].

Высказаны разные гипотезы образования бокситов контактово-карстового типа — постсидеритационная, как механокластические [8], так и кластогенные образования [9]; аутигенная; взрывного происхождения [10]; гидротермально-осадочная [11].

Дискуссия о происхождении контактово-карстовых месторождений Сибири касается следующих вопросов: происходила ли денудация уже латеритизированных пород или обломки амфиболитов были латеритизированы после перемещения их в карстовые воронки. Остается также неясным, консервируются ли денудированные продукты выветривания в карстовых депрессиях, прекращаются или продолжаются в них химические процессы.

Чтобы пролить свет на спорные вопросы о механизмах и стадиях образования контактово-карстовых бокситов, нами было проведено изучение химического и минерального составов бокситов и кристалломорфологических особенностей, вновь образованных и реликтовых пороодообразующих минералов из бокситов Татарского месторождения. Оно расположено в верхнем течении р. Татарки и занимает эрозионно-тектоническую котловину на высотах 350–450 м над уровнем моря, обрамленную на севере, западе и юге высотами Татарского хребта (до 800 м), а на востоке — увалами Татарского гранитного массива (до 650 м) [9].

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТАТАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождения бокситов приурочены к Центральному антиклинорию Енисейского кряжа, сложенного сильно дислоцированными метаморфизованными докембрийскими карбонатно-терригенными породами, прорванными интрузиями кислого и основного состава [5]. На многих из них были развиты и местами во впадинах сохранились латеритные коры выветривания. При крутом падении известняков и вдоль субвертикальных контактов с другими породами развивается глубокий карст, в котором располагаются рудные тела. Основная их часть, особенно верхние горизонты, были размыты и переложены в виде бокситоносных осадков. Палеоцен-эоценовый возраст (мурожинская свита) пород был установлен на основании данных спорово-пыльцевых анализов [9]. С этой свитой связано несколько групп

месторождений бокситов, сосредоточенных в трех регионах: в Центральном антиклинории, на восточной окраине и в юго-восточной части кряжа.

Бокситы залегают в карстовых воронках, вытянутых в виде цепи по простиранию известняков или вдоль контакта последних с амфиболитами. Размеры V-образных карстовых депрессий достигают 500 × 250 м, глубиной — до 260 м, т.е. немного ниже современной гидросети (рис. 1а).

Месторождение сложено дислоцированными известняками, кварцитами и филлитами среднего протерозоя. Широко развиты секущие и пластовые тела амфиболитов. В Татарской котловине на этих породах были развиты коры выветривания, перекрывавшиеся палеоцен-эоценовыми бокситоносными отложениями, которые сохранились в карстовых депрессиях некоторых месторождений. В центральной части котловины преобладают глины и бокситы, а на окраинах — песчаные и песчано-глинистые отложения с бокситами, содержащими обломки выветрелых и латеритизированных амфиболитов. На амфиболитах сохранилась кора выветривания, венчающаяся каолиновой зоной (рис. 1б).

Татарское месторождение состоит из 12 рудных тел, заполняющих карстовые воронки, и 2 тел — в останцах древних долинах. Карстовые депрессии выполнены бокситоносными палеоцен-эоценовыми отложениями. Выделяется от одного до трех рудных горизонтов: обнаружена смена (снизу вверх) бурых песчаных каолиновых глин пестроцветными глинами, бокситовыми глинами и отбеленными бокситами, и, наконец, углистыми глинами и углями, переполненными обломками и стяжениями каменистого боксита [5]. Каменистые или вермикулярные бокситы, как правило, находятся в верхних частях бокситоносных отложений, а глинистые расположены в нижней, наиболее глубокой части. В бокситах выявлены крупные обломки свежих, выветрелых и полностью латеритизированных амфиболитов. В рудах основную роль играют рыхлые и глинистые бокситы, составляющие соответственно 47,4 и 40,4% запасов месторождения соответственно [9].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было отобрано и изучено около 30 образцов бокситов и сопутствующих пород из скважин и обнажений Татарского месторождения.

Химический состав бокситов определен с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра Axios “RANalytical”.

Исследование минерального состава проводилось рентгенофазовым методом (РФА) на дифрактометре Ultima-IV “Rigaku”, методом синхронного термического анализа (СТА) и с помощью скани-

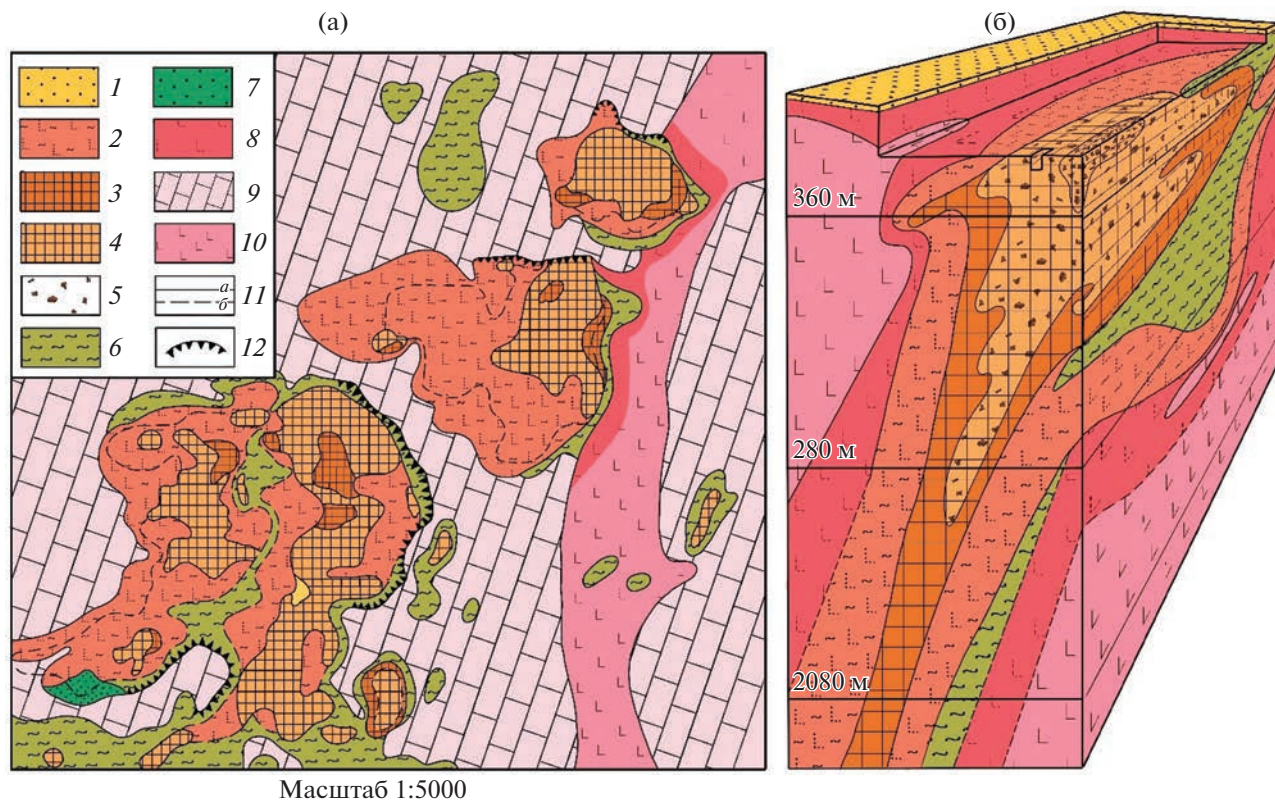


Рис. 1. Геологическая карта центральной части Татарского месторождения бокситов, Енисейский край (по Е.И. Пельтеку, [9]) (а) и перспективная блок-диаграмма рудного тела 9 (по Р.А. Цыкину, [12]) (б) с дополнениями. Чет-
вертичные отложения: 1 – покровные суглинки и глины; палеогеновые отложения мурожинской свиты отложения (продуктивная подсвита): 2 – глины пестроцветные, каолининовые, 3 – бокситы глинистые, 4 – бокситы рыхлые, 5 – бокситы каменистые, 6 – брекчиевидные глины и алевроито-глинистые отложения с обломками пород фундамента и бокситов, 7 – известковый кварцевый песок; 8 – кора выветривания амфиболитов; протерозойские отложения: 9 – известняки; протерозойский Индыглинский интрузивный комплекс: 10 – амфиболиты 11 – границы пород (а), контуры погребенных рудных тел (б); 12 – уступы карстового рельефа.

рующих (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°/мин в атмосфере воздуха в тигельках с закрытыми крышками до температуры 1050°C. Масса навески составляла ~40 мг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Химический состав

Были проанализированы каменистые, рыхлые и глинистые породы Татарского месторождения.

Содержание Al_2O_3 в каменистых или вермикулярных бокситах составляет от 41.44 до 59.45, в среднем 50.6 мас. %. Содержание SiO_2 изменяется от 1.48 до 7.97 мас. %, среднее значение составляет 3.3 мас. %. Значения TiO_2 меняются от 1.17 до 4.08, в среднем 2.9 мас. %. Содержание Fe_2O_3

варьируется достаточно широко – от 6.86 до 34.05 мас. %, в среднем составляет 19.62 мас. %. Содержание Na_2O от 0.05 до 0.39 мас. %; CaO – от 0.01 до 0.4 мас. %; MnO – от 0.02 до 0.04 мас. %; P_2O_5 – от 0.08 до 0.3 мас. %; MgO от 0.01 до 1.28 мас. %. По сравнению с другими исследуемыми образцами в каменистых бокситах повышенные содержания Cr от 570 до 1238, в среднем 938 г/т.

Содержание Al_2O_3 в рыхлых бокситах изменяется от 33.5 до 56.35 мас. %, в среднем составляет 44.2 мас. %. В данной группе образцов отмечается пониженное содержание воды, не соответствующее составу тригидрата алюминия. Значения SiO_2 меняются от 0.87 до 9.18 мас. %; TiO_2 – от 1.79 до 8.07 мас. %. Содержание Fe_2O_3 в этих образцах варьирует от 10.09 до 42.42 мас. %, в среднем 32.67 мас. %; Na_2O – от 0.07 до 0.3 мас. %; K_2O – от 0.03 до 0.05 мас. %; CaO – от 0.02 до 0.3 мас. %; MnO – от 0.01 до 0.13 мас. %; P_2O_5 – от 0.1 до 0.39 мас. %. В рыхлых бокситах по сравнению с

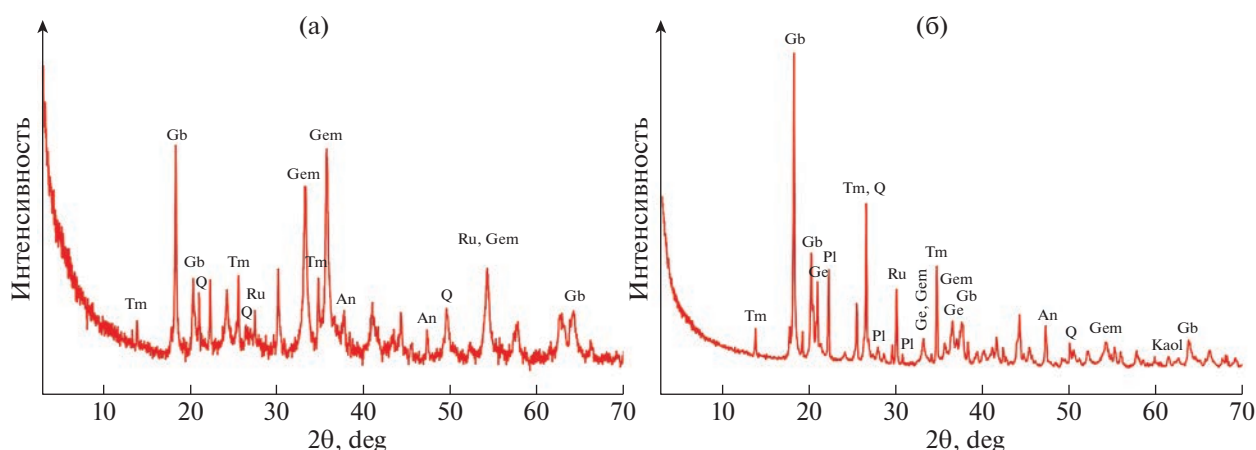


Рис. 2. Рентгенограммы бокситов: а – образец 06/74, б – образец 11/75. Gb – гиббсит, Ge – гетит, Gem – гематит, An – анатаз, Ru – рутил, Tm – турмалин, Q – кварц, Kaol – каолинит, Pl – плагиоклаз.

другими образцами отмечаются повышенные значения V и Nb от 509 до 946 и от 95 до 180 г/т соответственно.

Содержание Al_2O_3 в глинистых породах составляет от 15.89 до 26.29 мас. %, в среднем 22.75 мас. %. Значения SiO_2 изменяются от 36.89 до 46.6 мас. %, в среднем 41.21 мас. %. Содержания TiO_2 меняются от 1.58 до 7.2 мас. %, среднее значение – 3.59 мас. %. Содержание Fe_2O_3 варьирует от 14.02 до 17.08 мас. %, в среднем – 16.05 мас. %. Содержание других компонентов следующее (в мас. %): Na_2O от 0.1 до 0.5; K_2O – от 0.07 до 0.16; CaO – от 2.9 до 6.56; P_2O_5 – от 0.11 до 0.21. В образцах обнаружены повышенные содержания Ni, Cu, Zn и Ba по сравнению с другими. Это связано с отличными сорбционными свойствами глинистых пород. Содержание металлов (г/т): Ni от 95 до 254; Cu от 332 до 914; Zn от 125 до 401; Ba от 195 до 672.

Однако, по данным рентгенофлуоресцентного анализа, в некоторых пробах была установлена более высокая концентрация глинозема, чем его содержание в гиббсите.

Рентгенофазовый анализ

Результаты рентгенофазового анализа представлены в табл. 2 и на рис. 2. Во всех образцах бокситов основными минералами являются гиббсит, гематит и гетит. Помимо них в изученных образцах были обнаружены кварц, анатаз, каолинит, монтмориллонит, ильменит, рутил, плагиоклаз, турмалин и роговая обманка. Минералы были идентифицированы по наиболее важным и характерным межплоскостным расстояниям: гиббсит – 4.82 и 4.34 Å; гетит – 4.18, 2.69, 2.45 Å; гематит – 2.69, 1.69, 2.51 Å; кварц – 3.34, 4.25, 1.81 Å, анатаз – 3.51, 1.89, 2.37 Å, каолинит – 7.13,

1.49, 3.56 Å, монтмориллонит – 11.5, 1.49, 4.45 Å, ильменит – 2.74, 2.53, 1.72 Å, рутил – 1.68, 3.24, 2.48 Å, плагиоклаз – 2.95, 3.18, 4.03 Å, турмалин – 2.59, 4.48, 6.5 Å, роговая обманка – 1.05, 1.44, 2.71 Å.

Результаты рентгенофазового анализа позволили понять завышенное содержание глинозема. Поскольку не было выявлено в бокситах других минералов, содержащих алюминий, предполагается, что в них присутствует рентгеноаморфный оксид алюминия. Таким образом, впервые в бокситах Енисейского кряжа в образцах было обнаружено избыточное по сравнению с гиббситом содержание глинозема, обусловленное примесью рентгеноаморфной фазы, содержащей алюминий.

Синхронный термический анализ исследуемых образцов позволил установить влияние структурных особенностей, размера частиц гиббсита на характер полученных кривых. Отличительной особенностью гиббсита из осадочных бокситов является отсутствие на кривых ДСК дополнительных эндоэффектов в интервале дегидроксидации минерала (250–400°C), что мы и наблюдаем в основной массе образцов (рис. 3 а). Однако встречаются пробы, отобранные из центральных частей крупных образцов, в которых на графиках ДСК выделяется поэтапная дегидроксидация минерала, связанная с большими размерами кристаллов гиббсита, характерных для минералов, образованных исключительно *in situ* (рис. 3 б). В отдельных образцах было обнаружено присутствие турмалина, диссоциация которого отображается в виде эндоэффекта на кривой ДСК в температурном интервале 900–1050°C (рис. 3 в). Экзоэффект при температуре 1050–1200°C отвечает за переход $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. На рисунке 3 г изображена термическая кривая гиббсита с одним максимумом при температуре 341°C. Эндоэф-

Таблица 1. Химический состав бокситов Татарского месторождения

Образец	ППП мас. %	Na ₂ O мас. %	MgO мас. %	Al ₂ O ₃ мас. %	SiO ₂ мас. %	K ₂ O мас. %	CaO мас. %	TiO ₂ мас. %	MnO мас. %	Fe ₂ O ₃ мас. %	P ₂ O ₅ мас. %	S мас. %	Cr г/т	V г/т	Co г/т	Ni г/т	Cu г/т	Zn г/т	Ba г/т	Nb г/т
Каменистые бокситы																				
12/75	26.10	0.08	0.04	54.65	3.19	0.04	0.02	4.08	0.044	11.08	0.25	<0.02	1238	475	29	31	85	26	<10	68
12/2	27.71	0.05	0.01	55.35	1.48	0	<0.01	1.17	0.02	13.41	0.08	<0.02	570	314	33	22	114	121	11	16
11	28.37	0.07	0.00	59.45	1.51	0.04	0.02	2.89	0.028	6.86	0.30	<0.02	1095	449	27	18	57	19	41	54
09/75	11.75	0.39	1.28	42.09	7.97	0.03	0.41	2.82	0.033	32.71	0.16	0.04	704	468	46	117	68	63	15	28
10/75	17.60	0.07	0.05	41.44	2.44	0.03	0.03	3.59	0.047	34.05	0.25	0.04	1083	711	72	24	89	49	25	47
Рыхлые бокситы																				
04/74	16.28	0.17	0.47	43.75	2.93	0.04	0.15	3.33	0.047	32.37	0.11	0.03	347	658	69	13	154	51	22	95
01/74	13.06	0.08	0.05	43.98	1.19	0.03	0.04	3.65	0.038	37.36	0.14	0.04	477	640	42	<10	76	37	23	154
11/75	19.99	0.30	1.16	56.35	9.18	0.05	0.32	1.79	0.013	10.09	0.39	0.02	975	509	32	14	73	52	31	47
06/74	11.54	0.23	0.62	43.59	3.60	0.03	0.15	3.20	0.037	36.44	0.13	0.04	709	647	59	39	91	49	11	123
08/74	15.05	0.08	0.04	43.88	1.13	0.03	0.04	4.38	0.038	34.85	0.10	0.04	414	660	44	14	97	42	15	180
09/74	13.93	0.07	0.04	33.50	1.02	0.03	0.02	8.07	0.131	42.42	0.22	0.07	448	946	41	21	339	115	30	105
3Т	14.80	0.07	0.02	44.37	0.87	0.03	0.02	4.14	0.042	35.15	0.11	0.03	419	640	49	<10	99	34	16	165
Глинистые породы																				
15/74	6.41	0.53	3.70	26.17	36.89	0.16	6.56	1.58	0.231	17.05	0.16	<0.02	268	329	80	254	332	125	366	8
18/74	7.98	0.10	1.31	15.89	46.60	0.07	2.90	7.20	0.161	17.08	0.21	<0.02	100	637	60	95	914	149	195	42
19/74	11.11	0.11	1.67	26.19	40.15	0.11	3.81	2.00	0.303	14.02	0.11	<0.02	68	325	49	193	590	401	672	15

Таблица 2. Минеральный состав карстовых бокситов и глинистых пород с Татарского месторождения (мас. %)

Образец	Смектит	Каолинит	Кварц	Плагиоклаз	Роговая обманка	Турмалин	Анализ	Ильменит	Рутил	Гетит	Гематит	Гиббсит	Рентгеноаморфная фаза
Каменистые бокситы													
12/75	н.о.	н.о.	3	н.о.	н.о.	н.о.	11	н.о.	н.о.	5	6	75	н.о.
12/2	н.о.	н.о.	1	н.о.	н.о.	н.о.	1	н.о.	н.о.	5	8	85	н.о.
11	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3	н.о.	н.о.	3	3	91	н.о.
9/75	н.о.	н.о.	2	1	н.о.	15	н.о.	н.о.	н.о.	10	21	48	3
10/75	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3	н.о.	н.о.	10	24	55	8
Рыхлые бокситы													
4/74	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3	3	н.о.	н.о.	н.о.	32	50	12
1/74	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	3	н.о.	н.о.	н.о.	37	35	25
11/75	н.о.	1	2	6	н.о.	9	н.о.	н.о.	н.о.	5	5	52	20
6/74	н.о.	н.о.	2	н.о.	н.о.	5	1	н.о.	2	н.о.	34	32	24
8/74	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	4	н.о.	н.о.	н.о.	34	43	19
9/74	н.о.	н.о.	1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	6	2	16	27	30	18
3Т	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	4	н.о.	н.о.	н.о.	35	43	18
Глинистые породы													
19/74	20	39	11	2	6	н.о.	н.о.	н.о.	2	11	4	5	н.о.

фект имеет правильную форму, характерную для кристаллов гиббсита с упорядоченной структурой [13, 14], образованного по биопленкам в процессе латеритизации, продолжающейся после денудации (рис. 4 ж).

Количественное соотношение минералов в бокситах можно определить только сопоставлением трех методов – рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и термического: содержание гиббсита – от 30 до 90 мас. %, рентгеноаморфного оксида алюминия – от 3 до 25 мас. %, гематита – от 14 до 57 мас. %, гетита – от 6 до 22 мас. %. Также присутствуют минералы, характерные для материнских пород – амфиболитов: плагиоклаз, роговая обманка и турмалин. Результаты сведены в табл. 2.

Сканирующая электронная микроскопия

В СЭМ видно, что в тонкодисперсном глинистом матриксе присутствуют обильные поры, каверны и обломки древесины. Очертания пор имеют треугольные, призматические формы, свидетельствующие о растворении кварца. Квадратные и ромбовидные формы являются следами растворенных зерен кальцита. Фитоморфозы ожелезненны и в них хорошо прослеживаются гематитовые биоморфозы по бактериям (рис. 4 а, б). СЭМ поз-

волила установить морфологию кристаллов. Свежие идиоморфные кристаллы амфиболов и полевых шпатов хорошо сохраняют первичные формы (рис. 4 в). В отдельных кристаллах имеются каверны, выполненные друзами кристаллов гиббсита (рис. 4 г). На поверхности кристаллов также наблюдаются новообразованные зерна гиббсита. Матрикс в интерстициях между кристаллами амфибола замещен смесью каолинита и гиббсита. Наконец, наблюдаются участки амфиболитов, которые полностью замещены гиббситом.

В осадочных бокситах в сильно диспергированной среде встречаются каверны, на стенках которых развиты новообразованные полусферические выделения таблитчатых кристаллов гиббсита. На поверхностях бобовин выявлены корки короткопризматических кристаллов гиббсита (рис. 4 д).

В тонкодисперсном матриксе встречаются крупные реликтовые кристаллы ильменита, хорошо сохранившие свою форму. В химическом составе ильменита имеется значительная – до 4 мас. % – примесь V (рис. 4 е). Выявлены также кварц, анатаз и рутил – реликтовые минералы амфиболитов. Их содержание колеблется в пределах первых процентов. Следует подчеркнуть, что часть титана не связана с этими минералами, а

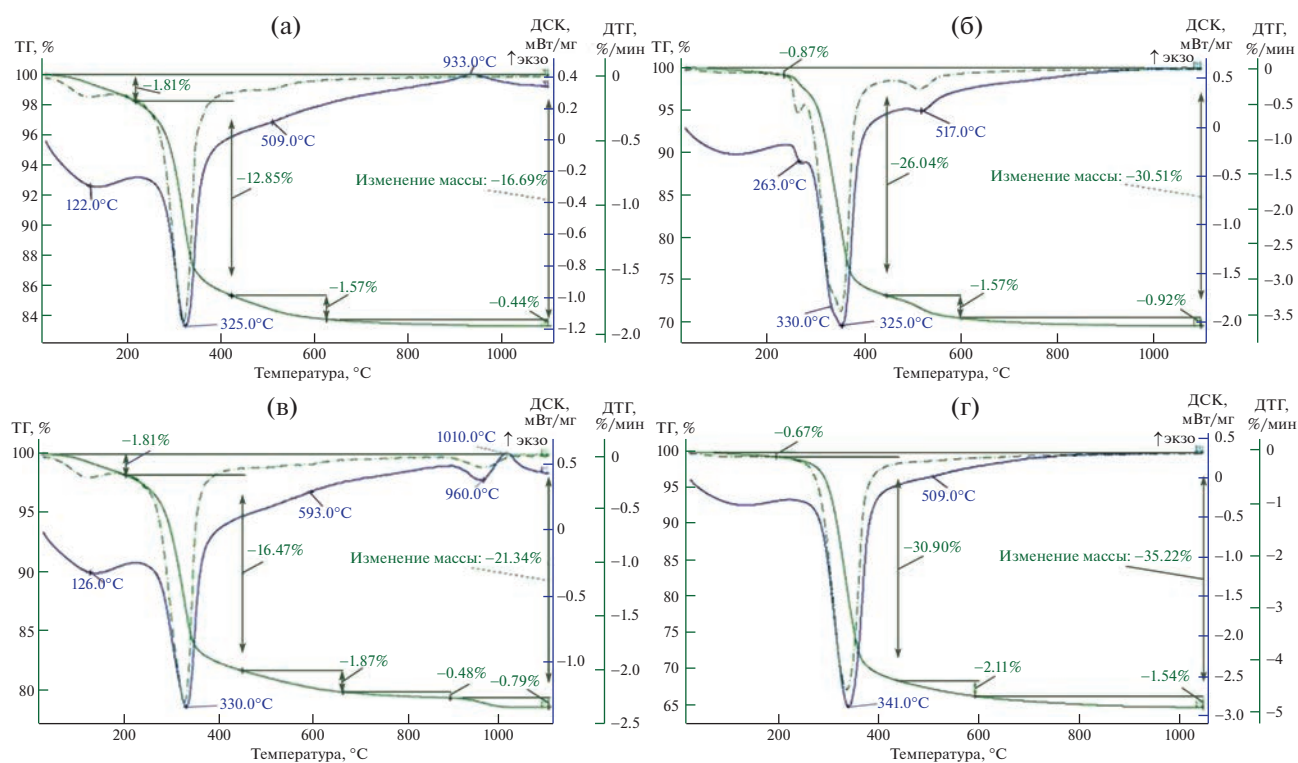


Рис. 3. Термические кривые бокситов: а – обр. 3Т, б – обр. 12Т/3, в – обр. 11/75, г – обр. 6Т.

сорбирована биопленками. Все минералы латеритизированных амфиболитов не имеют следов механического перемещения, т.е. все они залегают *in situ*.

Изредка в бокситах встречаются остатки не полностью растворенных зерен кальцита. Осадочные бокситы обильно пронизаны биоминеральными пленками. Они имеют разнообразный облик. Могут встречаться в виде тонких покровов, пушистых снегообразных налетов. Химический состав их очень разнообразен. По алюминиевым пленкам образуется биогенный гиббсит. По пленкам более сложного состава образуется гиббсит с примесями Fe, Dy, Yb (рис. 4 ж). Гематит находится в виде охристых псевдоморфоз по амфиболам, каркасных кристаллических решеток, биоморфоз и раскристаллизованных биоминеральных пленок. Нераскристаллизованные биопленки алюминиевого состава теряют воду и образуют рентгеноаморфный оксид алюминия (рис. 4 з).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что Татарское месторождение бокситов возникло в результате седиментации в контактово-карстовых депрессиях продуктов денудации латеритных бокситов, образованных по амфиболитам и другим породам.

В районе Татарского месторождения в мел-палеогеновое время создались условия, при которых материнские породы — амфиболиты и продукты их переотложения: крупные обломки выветрелых и латеритизированных амфиболитов в контактово-карстовых бокситах оказались в теснейшем соседстве. Благодаря такой близости и крутым контактам выветрелых амфиболитов и известняков, в дезинтеграции, денудации и аккумуляции проявился ряд особенностей. Так, во всех бокситах карстовых и эрозийных депрессий на соседней Сибирской платформе очень редко встречаются обломки псевдоморфных бокситов размером даже в 1–2 см. В бокситах Татарского месторождения в изобилии обнаружены такие обломки даже более 10 см [15]. С ними смешаны обломки стволов и веток деревьев с биоморфозами гематита (рис. 4 а, б). Это свидетельствует об очень коротком пути транспортировки денудированных амфиболитов до бассейна их аккумуляции в карстовых депрессиях. В крупных обломках свежих и выветрелых амфиболитов сохранились текстурно-структурные особенности первичных, образованных *in situ* пород. Среди них выявлены идиоморфные кристаллы амфиболов (рис. 4 в). На графиках ДСК наблюдаются дополнительные эндоэффекты в интервале дегидроксилации (рис. 3 б), свидетельствующие о том, что образование гиббсита в породе происходило *in situ* до того, как она была перемещена в карстовую депрес-

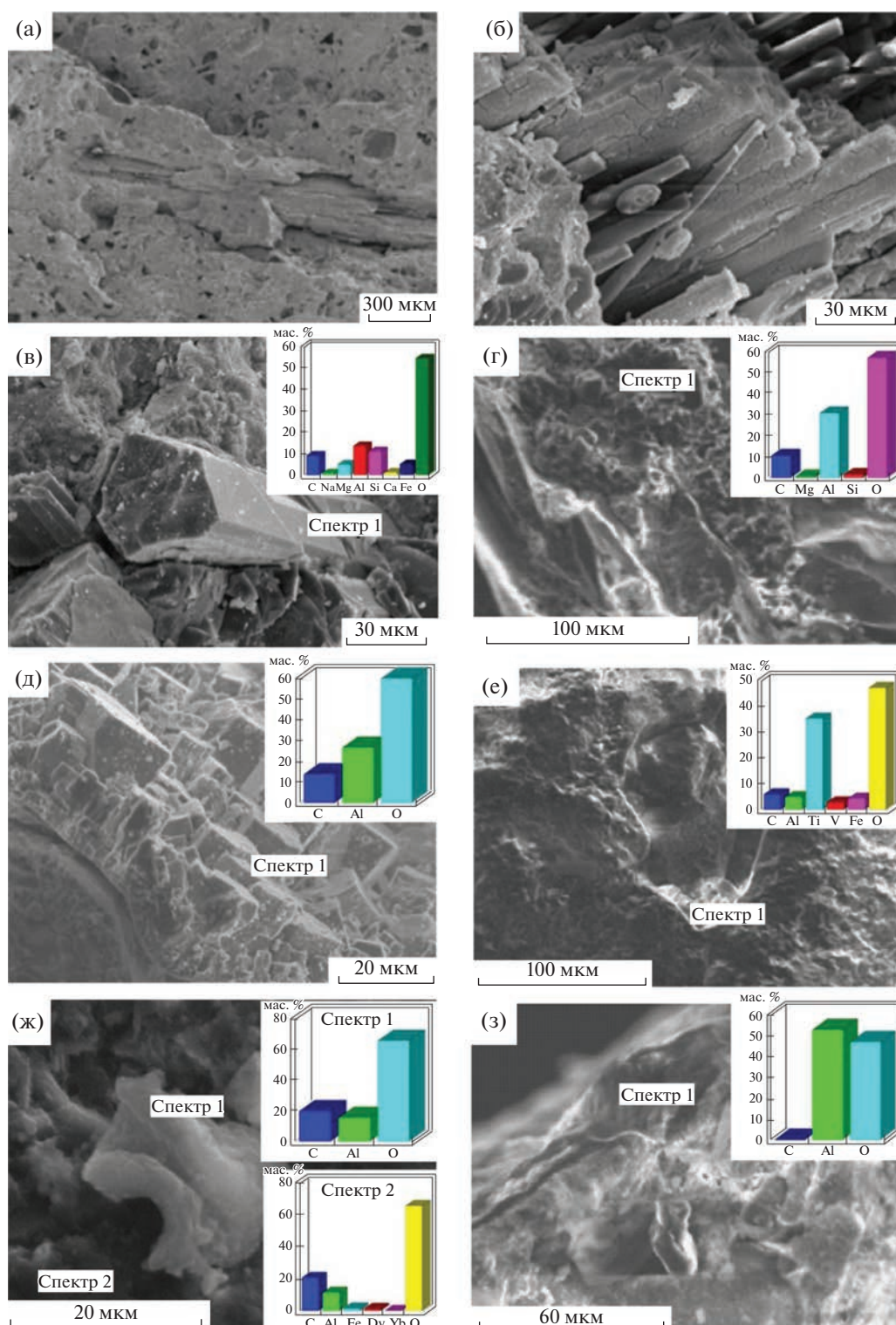


Рис. 4. Тонкодисперсный глинистый матрикс бокситов (а), фитоморфозы по древесине и биоморфозы по бактериям (б), идиоморфные кристаллы амфиболов (в), каверны, выполненные друзами кристаллов гиббсита (г), корки коротко-призматических кристаллов гиббсита (д), кристалл ильменита (е), биопленки сложного состава, биогенный гиббсит (ж), аморфный гидроксид алюминия (з) СЭМ. ЭДС состава.

сию. Сохранившиеся кристаллы гиббсита — подтверждение близкого контакта продуктов из областей питания и аккумуляции. Гиббсит — главный минерал латеритизированных амфиболитов. Его содержание в отдельных образцах достигает 91 мас. %. Он обнаружен в виде псевдоморфоз гексагональных таблитчатых кристаллов, замещающих полевые шпаты и амфиболы, в виде друз таблитчатых, призматических и пирамидальных кристаллов в кавернах и трещинах и скрытокристаллических гнездообразных выделений. Содержание гиббсита в боксите уменьшается с глубиной.

После денудации и аккумуляции в карстовые депрессии происходит преобразование осадка. В электронном микроскопе отчетливо видно, что диспергированные частицы тонкодисперсного матрикса бокситов находится в тесной беспорядочной смеси (рис. 4 а). Образуются многочисленные каверны, трещины, множество ходов роющих организмов, по которым фильтруются химически- и биохимически активные воды. Дождевые воды обогащаются органическими кислотами, проникают на глубину по трещинам, растворяя тонкодисперсные минералы. В преобразовании бокситов участвуют также поверхностные и подземные карстовые водотоки [15].

В крупных трещинах растворенный глинозем выделяется в виде корок и друз кристаллов гиббсита. В тонкодисперсном матриксе он растворяется и вновь кристаллизуется, облекая бобовины и стенки каверн (рис. 4 д). Наличие биогенного гиббсита подтверждается методом термического анализа (рис. 3 г). Эндоэффект на кривой ДСК имеет форму, характерную для кристаллов гиббсита с упорядоченной структурой. В то же время обводненные поверхности минералов покрываются обильными биоминеральными пленками (рис. 4 ж). Они обладают высокими сорбционными способностями, обогащая бокситы различными химическими элементами — Al, Ti, Fe, Dy, Yb и др. Редкоземельные элементы были принесены поверхностными и карстовыми водами из Татарского массива нефелиновых сиенитов и проявлений карбонатитов [15]. Таким образом, мы можем подтвердить, что процесс латеритизации продолжался после осадконакопления.

Впоследствии, в результате изменившихся условий, процесс латеритизации был прерван, а оставшийся глинозем сохранился в виде аморфного моногидрата алюминия (рис. 4 ж). Содержание Al_2O_3 значительно превышает количество глинозема, который может входить в состав гиббсита, что отчетливо отражается на ЭДС состава (рис. 4 з). По мере увеличения глубины в карстовых воронках, содержание рентгеноаморфного оксида алюминия в бокситах увеличивается

(табл. 2). Это объясняется затуханием процессов латеритизации с глубиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили достоверно установить контактово-карстовый генезис Татарского месторождения и его особенности. Главным признаком является максимально близкое расположение областей питания и аккумуляции. Продукты разрушения материнских пород сносились непосредственно в карстовые депрессии. В них попадали не только продукты поверхностной плоскостной денудации, но и породы из вертикальных обнажений профиля коры выветривания. Таким образом, в рудных телах смешивались собственно латеритные бокситы и нижележащие породы.

В продуктах выветривания великолепно сохраняется реликтовая структура амфиболитов. В осадочных бокситах в карстовых депрессиях гиббсит хорошо сохраняется в обломках латеритизированных амфиболитов. Тонкодисперсный матрикс, испещренный точечными пустотами, оставшимися на месте растворенных зерен карбоната и кварца, а также обилие биоминеральных пленок и продуктов их кристаллизации — несомненные признаки продолжающихся процессов выветривания, свойственных латеритизации.

Для контактово-карстовых бокситов выявлено присутствие наночастиц аморфного оксида алюминия. Эта характерная особенность формы выделения глинозема связана с прекращением процессов латеритизации и затуханием их с глубиной. Наличие аморфного моногидрата алюминия необходимо учитывать при подборе схемы обогащения бокситов.

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. Боева Н.М., Слукин А.Д., Шипилова Е.С., Макарова М.А., Балашов Ф.В., Жегалло Е.А., Зайцева Л.В., Бортников Н.С. Редкие и редкоземельные элементы в латеритизированных бокситах Чадобецкого поднятия (Сибирская платформа) // Доклады Академии наук. Науки о земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 17–25.
2. Боева Н.М., Макарова М.А., Шипилова Е.С., Слукин А.Д., Мельников Ф.П., Каримова О.В., Бортников Н.С. Два генетических типа бокситов Центрального месторождения и их редкометалльная составляющая (Сибирская платформа) // Доклады Академии наук. Науки о земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 23–34.

3. Минеральные ресурсы Красноярского края. Кадастр месторождений полезных ископаемых / редактор С. С. Сердюк. Красноярск, РИЦ КНИИ-ГиМС, кн.1,2, 2002. 581 с.
4. *Bardossy G.*, Karst bauxites: bauxite deposits on carbonate rocks. 1982. In: *Dev. Econ. Geol.* 14. Elsevier, Amsterdam, 441 p.
5. *Кирпаль Г.Р.* Промышленные типы месторождений бокситов и их геолого-экономическая оценка. М., Недра. 1977. 261 с.
6. *Mongelli G., Boni M., Oggiano G., Mameli P., Sinisi R., Buccione R., Mondillo N.* Critical metals distribution in Tethyan karst bauxite: The cretaceous Italian ores // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 86. P. 526–536.
7. *Yang S., Wang Q., Deng J., Wang Y., Kang W., Liu X., Li Z.* Genesis of karst bauxite-bearing sequences in Baofeng, Henan (China), and the distribution of critical metals // *Ore Geology Reviews*. 2019. V. 115. 103161.
8. *Шибистов Б.В.* Латериты и континентальные бокситы. Красноярск, РИУ КНИИГиМС, 2000. 204 с.
9. Платформенные бокситы СССР /под ред. Д.Г. Сапожникова. М.: “Наука”, 1971. 387 с.
10. *Черкасов Г.Н.* Геодинамика бокситообразования на примере месторождений Аравии и Сибири // Проблемы геологии, рудогенеза и минерагении Сибири. Сб. науч. Трудов СНИИГГиМС. Новосибирск, 2000. С. 29–38.
11. *Разумова В.Н.* К вопросу о происхождении бокситов / в кн. Процессы континентального литогенеза. Труды ГИН АН СССР. В. 350 М., Наука. 1980. С. 60–92.
12. *Цыкин Ростислав Алексеевич:* биобиблиографический указатель / сост. Е.А. Наприенко, С.П. Аникина, Н.М. Сафонова; отв. за вып. В.А. Корешкова. – Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2015. 113 с.
13. *Boeva N.M., Bortnikov N.S.* The Dimensional Effect and Crystal Morphological Peculiarities of Gibbsite in a Bauxite-Bearing Weathering Crust // *Doklady Earth Sciences*. 2023. V. 510. № 1. P. 525–531.
14. *Boeva N.M., Bortnikov N.S., Slukin A.D., Shipilova E.S., Makarova M.A., Melnikov F.P.* Biofilms and Biominerals in the Lateritic Weathering Crust as Exemplified by the Central Bauxite Deposit (Siberian Platform, Russia) // *Minerals*. V. 11. № 11. P. 1184–1195.
15. *Слукин А.Д.* Условия формирования бокситоносного карста Сибирской платформы и Енисейского кряжа / в кн.: Рудоносный карст Сибири. Сб. науч. Трудов. Новосибирск, СНИИГГиМС. 1989. С. 22–33.

BAUXITES OF THE TATAR DEPOSIT (YENISEI RIDGE, RUSSIA): THE FIRST EVIDENCE OF CONTACT-KARST GENESIS

N. M. Boeva^{a, #}, A. D. Slukin^a, M. A. Makarova^a, E. S. Shipilova^a, Ph. P. Melnikov^a, D. A. Vnuchkov^a,
E. A. Zhegallo^b, L. V. Zaitseva^b, 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*

^b*Paleontological Institute of Borisyak of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

The Tatar bauxite deposit on the territory of the Russian Federation was formed as a result of sedimentation in contact-karst depressions of the products of denudation of lateritic weathering crusts of amphibolites. Detailed mineralogical studies of bauxites made it possible to reliably reconstruct the conditions for their formation. As it turned out parent rocks and weathered before rocks occurred due to the close location of the areas of nutrition and accumulation and denudation. At the same time, chemical processes was continuing in karst depressions. For the first time, the presence of nanoparticles of amorphous aluminum oxide was revealed into contact-karst bauxites. This characteristic feature of the form of alumina precipitation is associated with the subsequent cessation of lateritization processes and their attenuation with depth. The presence of amorphous aluminum monohydrate must be taken into account when choosing a scheme for bauxite enrichment.

Keywords: bauxite, contact-karst, gibbsite, X-ray amorphous aluminum monohydrate, rare and rare earth elements