

УДК 553.311:553.492(470.325)

doi: 10.26907/2542-064X.2020.2.274-289

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ БОКСИТОВ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

А.Д. Савко, М.Ю. Овчинникова

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, 394018, Россия

Аннотация

Бокситоносная палеозойская кора выветривания (КВ) Курской магнитной аномалии (КМА) развита по межрудным сланцам железисто-кремнистой формации курской серии. На джеспилитах КВ представлена богатыми железными рудами (БЖР), которые вместе с бокситами образуют серию месторождений. Они приурочены к грядам железистых кварцитов, возвышающихся в рельефе докембрия и перекрытых мощным чехлом осадочных отложений. Полученный в последнее время каменный материал и использование прецизионных методов его изучения позволили в значительной мере уточнить и скорректировать имеющиеся представления о бокситах КМА. По текстурно-структурным признакам и минеральному составу всё их разнообразие сведено к пяти основным типам: 1 – тонкопористые существенно бемитовые, 2 – макропористые бертьерин-бемитовые, 3 – каменистые гидрогематит-бертьерин-бемитовые, 4 – массивные бертьерин-каолинит-бемитовые, 5 – псевдобобовые существенно гиббситовые и бертьерин-гиббситовые. Преимущественно гиббситовые разности тяготеют к северной, бемитовые – к южной частям Белгородского рудного района. Основные минералы бокситов: бемит, гиббсит, бертьерин и каолинит, второстепенные – иллит, гематит (гидрогематит), кварц, гетит, шамозит, пирит, карбонаты, акцессории. Они формировались в несколько этапов. В додевонское (доэйфельское) время по межрудным сланцам образовалась иллитовая КВ. С живецкого времени в связи гумидизацией климата и выходом на сушу растительности развивался иллит-каолинитовый профиль. Латериты с бокситами появились в раннем карбоне и только в Белгородском районе КМА, который не был перекрыт морским бассейном в отличие от остальной территории. Наложённые на КВ диагенетические и эпигенетические процессы привели к силификации и карбонатизации самых верхних частей разреза бокситов.

Ключевые слова: Курская магнитная аномалия, бокситы, кора выветривания, гиббсит, бемит, бертьерин, каолинит

Введение

Бокситы Курской магнитной аномалии (КМА) были открыты в середине прошлого века в Белгородском рудном районе при разведке железных руд раннего протерозоя и поначалу интенсивно изучались имеющимися в то время методами исследований. Но затем интерес к ним ослабел из-за залегания месторождений на большой глубине и в связи с появившимися возможностями толлинга, позволившими покрыть дефицит алюминиевого сырья в стране. Но использование новых технологий разработки полезных ископаемых, опробованных на богатых железных рудах (БЖР) КМА [1], представляющих кору выветривания (КВ)

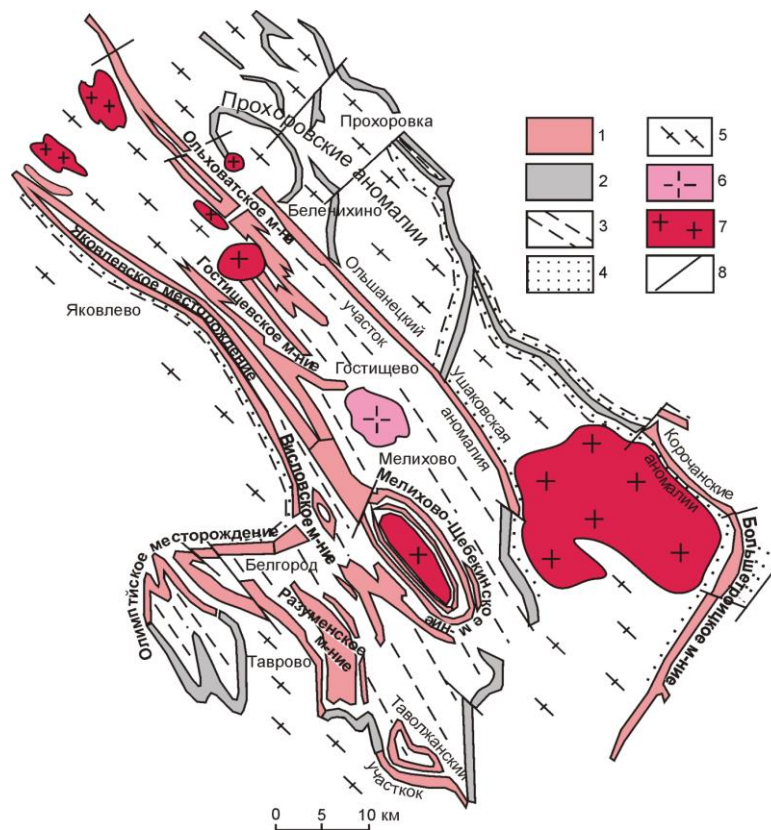


Рис. 1. Схема расположения месторождений БЖР и бокситов. Из работы [1]. 1 – КВ дже-спилитов и сланцев; 2 – выходы джеспилитов на поверхность докембрия с маломощной (до 10 м) КВ. Породы: 3 – оскольской; 4 – стойленской свит курской серии; 5 – архея; 6– сиениты шебекинского; 7 – граниты атаманского комплексов; 8 – тектонические нарушения

на джеспилитах и залегающих совместно с развитыми по межрудным сланцам бокситами, позволяет вернуться к изучению последних. Этому способствовало получение нового каменного материала, а также использование прецизионных методов при его изучении, поскольку минералы бокситов имеют очень малые размеры и находятся в тонких смесях.

Бокситоносная палеозойская КВ в пределах КМА развивается по межрудным сланцам железисто-кремнистой формации коробковской свиты курской серии [2]. Сланцевые подсвиты этой свиты (нижняя и верхняя) образуют пласты мощностью от первых до 200 м. По минеральному составу в нижней подсвите выделяются наиболее благоприятные для образования бокситовых залежей углисто-слюдистые сланцы. Они представлены углисто-биотитовыми и углисто-серицитовыми породами при различных соотношениях биотита и серицита, содержание кварца в них от 10% до 30 %. Верхняя сланцевая подсвита по составу разнообразней нижней. Это углисто-слюдистые, углисто-кварц-слюдистые, кварц-серицитовые, карбонатно-кварц-серицитовые разности. Биотит и серицит присутствуют в мелких ориентированных чешуях.

БЖР и бокситы образуют ряд месторождений (рис. 1), в том числе комплексных железо-алюминиевых руд. Они приурочены к грядам железистых кварцитов,

которые возвышаются в рельефе докембрия на десятки метров. Они перекрыты осадочным чехлом карбона и мезокайнозоя общей мощностью свыше 500 м. Вне град железистых кварцитов на архейских гнейсах, в пониженные формы рельефа одновременно с бокситами сформировалась каолиновая КВ.

Фактический материал и методика исследований

Были изучены около 40 проб бокситов из Яковлевской шахты, Висловского, Ольховатского и Мелихово-Щебекинского месторождений. Лабораторное изучение каменного материала включало: 1 – изготовление и описание прозрачно-полированных шлифов и аншлифов отобранных пород. Для рыхлых руд изготавливались искусственные шлифы на основе эпоксидной смолы (43 шлифа). Анализ материала и интерпретация данных проводились на основе: 2 – электронно-микроскопических снимков, полученных с использованием растрового электронного микроскопа Jeol 6380LV (ЦКПНО ВГУ, аналитик Н.С. Базиков); 3 – локального рентгеноспектрального анализа с помощью системы OXFORD INS; 4 – рентгеновского анализа на порошковом дифрактометре ARL X'TRA (ЦКПНО ВГУ). В тонких смесях минералов бокситов последний вид анализа является самым надежным.

Помимо авторской интерпретации полученных анализов проводился критический пересмотр материалов ранее опубликованных работ, в том числе многочисленных прецизионных анализов. При этом выяснилось, что широко распространенный в бокситах бертьерин интерпретировался как шамозит из-за близости их базальных отражений на дифрактограммах. А поскольку шамозит в КВ минерал наложенный, то получалось, что большая часть пород профиля выветривания подверглась наложенным процессам. Это не соответствует действительности.

Результаты исследований

КВ алюмосиликатных пород имеет мощность от нескольких до 150 м и обладает четко выраженной зональностью (табл. 1). Мощности зон и подзон КВ крайне изменчивы из-за неоднородного состава материнских пород, морфологии рельефа, размывов и наложенных процессов. Наиболее полные профили пространственно тяготеют к залежам БЖР. Самые мощные КВ связаны с зонами повышенной трещиноватости на контактах джеспилитов и сланцев.

Бокситовая подзона конечного гидролиза наиболее обогащена глиноземом и в большей своей части представлена кондиционными разностями [5]. Нижняя сиаллитно-аллитовая подзона является переходной к кондиционным бокситам, верхняя образовалась при наложенных на бокситы диагенетических и эпигенетических процессах. Границы между бокситовой и сиаллитно-аллитовыми подзонами постепенные. В породах III зоны заметную роль играют каолинит и бертьерин, в ней еще сохраняются текстурные особенности материнских пород. Бокситы в профиле выветривания развиты не повсеместно. Они могут отсутствовать, что связано не только с их размывом, но и процессами десилификации, недостаточными для превращения выветрелых сланцев в высокоглиноземистые породы.

Табл. 1

Схема зональности КВ алюмосиликатных пород КМА по [5] с дополнениями.

Зоны КВ	Подзоны	Литологические признаки, мощность	Минералы
IV – конечного гидролиза	Верхняя сиалитно-аллитовая	Бокситы пелитоморфные белые, красновато-бурые, часто пятнистые, псевдобовые, макропористые, местами обохренные, массивные. В верхней части содержат выделения каолинита и бертьерина. Мощность до 10 м, том числе кондиционных бокситов до 8, в среднем 5–6 м	Бемит, гиббсит, бертьерин, гетит, каолинит, карбонаты, сульфиды
	Подзона кондиционных бокситов		
	Нижняя сиалитно-аллитовая		
III – конечного разложения (гидролиза и окисления)		Реликтовая текстура сланцев сохраняется. По цвету породы светлые, бледно-зеленые, иногда бурые на поверхности, мягкие, жирные на ощупь. Мощность от 5 до 40 м	Каолинит, иллит, реликты алюмосиликатов, бертьерин.
II – промежуточного разложения (обширной гидратации и окисления)		Сохраняется реликтовая текстура сланцев, породы дезинтегрированные до щебнево-дресвяной отдельности. По цвету породы белесые, светло-серые с пятнистым окрашиванием. Мощность зоны от 10 до 45 м	Иллит, маршаллит-зированный кварц, минералы материнских пород
I – начального разложения (начальной гидратации и окисления)		Сохраняются структурно-текстурные признаки материнских пород, породы слегка обохрены по плоскостям сланцеватости, мощность зоны от 10 до 50 м	Минералы материнских пород, окисляются пирит, магнетит и биотит

Образования II зоны частично дезинтегрированы, несут текстурные признаки сланцев, содержат иллит, реликты материнских минералов, в том числе кварц.

Рассматриваемые бокситы отличаются по структурно-текстурным признакам, физическим свойствам и минеральному составу. Нами всё разнообразие бокситов КМА сведено к пяти основным типам. Их характеристика приведена ниже.

Тонкопористые существенно бемитовые бокситы (рис. 2, а) характеризуются размером пор менее 0.05 мм, их количество до 50% объема породы. Обычны в подзоне кондиционных бокситов. Они землистые, рыхлые, буроватого, белого и кремового цветов, хрупкие, полурыхлые. Основная масса микрокристаллическая, однородная, оптическими методами отдельные зерна не просматриваются, только под электронным микроскопом различимы минеральные агрегаты. Преобладает бемит (70–90%), могут присутствовать каолинит и бертьерин.

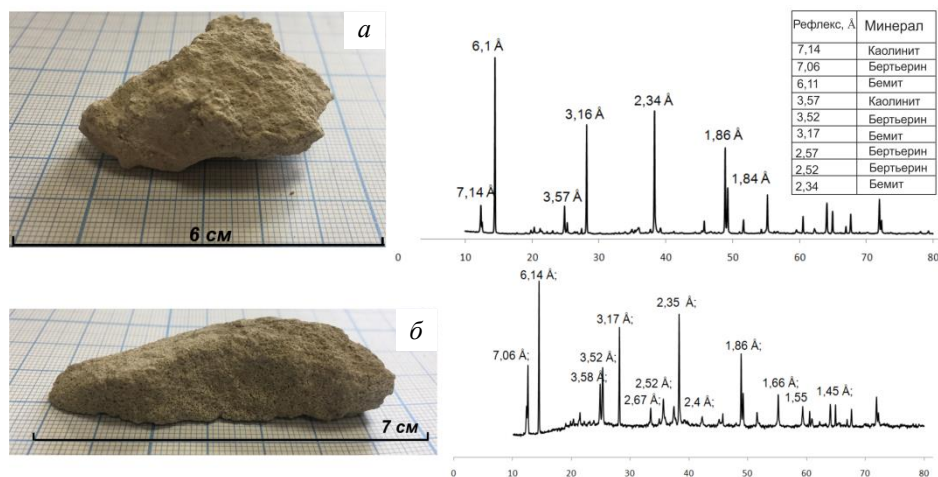


Рис. 2. Разновидности бокситов и их дифрактограммы: *a* – боксит существенно бемитовый микропористый с каолинитом (Мелихово-Шебекинское месторождение); *б* – боксит бертьерин-каолинит-бемитовый (Яковлевское месторождение)

Макропористые бертьерин-бемитовые бокситы серовато-зеленого цвета, плотные, каменистые, с неровным изломом, крепкие с рельефной поверхностью, покрытой многочисленными порами и кавернами (рис. 2, *б*). Размеры последних до 1 см, если большие, то образуются губчатые разновидности. Основная масса породы разнородная микрокристаллическая, представлена бемитом и бертьерином в различных процентных соотношениях. В малых количествах может присутствовать каолинит. Этот тип развит в подзоне кондиционных бокситов и в нижней сиаллитно-аллитной подзоне.

Массивные каолинит-бертьерин-бемитовые бокситы (рис. 3, *a*) – плотные, глиноподобные, светлоокрашенные с преобладанием светло-зеленой и серовато-зеленой окрасок, микрозернистые. Местами по поверхности напластования они приобретают охряно-желтый окрас за счет примеси гидроокислов железа. Иногда эта разновидность имеет полосчатую текстуру, обусловленную чередованием полос кремово-серого цвета (каолинитового и бемитового составов) и грязно-зеленого (бертьеринового состава). Основная масса породы сложена скрытокристаллическим бемитом, чешуйчатым бертьерином и гелеморфным каолинитом. Распределение минералов в породе крайне неравномерное.

Каменистые гидрогематит-бертьерин-бемитовые бокситы плотные, со ступенчатым изломом, неясно полосчатые, иногда – мелкопятнистые. Их окраска пестрая, темно-красная, красновато-бурая и кирпично-красная за счет присутствия гидроокислов железа (рис. 3, *б*). Бертьерин придает рудам плотное сложение, минералы распределены крайне неравномерно. Рассматриваемый тип развит в приконтактной зоне с БЖР.

Псевдобобовые существенно гиббситовые и бертьерин-гиббситовые бокситы приурочены к поднятиям высшего порядка и распространены обычно в северной части Белгородского района КМА (Ольховатское месторождение).

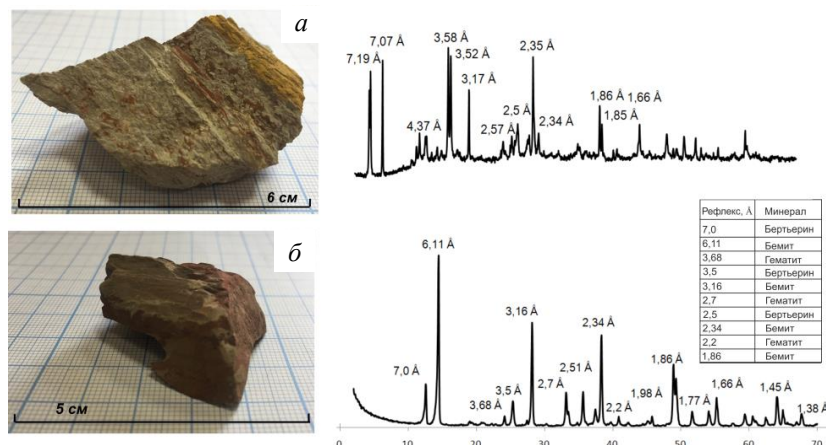


Рис. 3. Разновидности бокситов и их дифрактограммы: *a* – боксит плотный бемит-бертьерин-каолининовый полосчатый с реликтовой текстурой (Яковлевское месторождение); *б* – боксит бурый каменистый гидрогематит-бертьерин-бемитовый (Мелихово-Шебекинское месторождение)

Они псевдобобовые, макропористые, пятнисто окрашенные в зеленоватые, светло-бурые, иногда бурые цвета, каменистые. Породы состоят из псевдобобовин и основной массы. Такая текстура характеризуется присутствием в боксите неравномерно распределенных сферических конкреций диаметром 0.5–1 см, плотно сцементированных основной массой. В ней широко развиты поры. Псевдобобовины распределены неравномерно, редко соприкасаются, чаще разделены цементом между собой. Они сложены бертьерин-гипбситовой смесью, имеют светло-серую и светло-бурую окраски, тогда как их цемент коричневато-бурый с преобладанием гипбсита и гетита. До 80% объема породы составляет гипбсит, присутствуют гетит и бертьерин, в бобовинах отмечены скопления мелкокристаллического гематита. Гипбситовые и бертьерин-гипбситовые бокситы развиты в зоне конечного гидролиза в подзоне кондиционных бокситов.

Таким образом, исследование прецизионными методами бокситов показало их сложный минеральный состав. Он сформировался в течение нескольких этапов. Ниже нами рассмотрены минералы материнских пород, гипергенные (из КВ), диагенетические и эпигенетические.

Минералы материнских пород в бокситах представлены гематитом и акцессориями. В нижних частях бокситоносного профиля имеются иллит по мусковиту и гидратированный биотит, унаследованные из древних КВ.

Гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ является одним из основных минералов джеспилитов и БЖР. Находится в микрокристаллических единичных пластинчатых и таблитчатых реликтах (1–5 μm). Обнаружен также в бемитовых бокситах (2–5% объема породы). В гипбситовых разновидностях сосредоточен в бобовинах и может составлять до 15% от их объема. Основная масса гематита в верхах разрезов КВ переходит в гидроокислы железа и гидрогематит. Помимо гематита в бокситах обычно сохраняются ильменит, сфен, рутил, пирит, турмалин, циркон, монацит.

Табл. 2

Химический состав бемита по данным микронзондирования

Компоненты	Содержание компонентов в бемите, вес. %			
	1	3	5	10
SiO ₂	2.64	0.98		
Al ₂ O ₃	73.76	75.65	78.96	76.17
FeO _{общ}	1.18	1.29		
Сумма	77.58	77.92	78.96	76.17

Примечание: 1 – боксит бемитовый, микропористый (Мелихово-Шебекинское месторождение); 3 – боксит бертьерин-бемитовый (Висловское месторождение); 5 – боксит бемитовый (Яковлевское месторождение); 10 – боксит плотный бертьерин-бемитовый (Яковлевское месторождение).

Гипергенные минералы – бемит, гиббсит, бертьерин, каолинит, иллит, гетит, гидрогематит.

Бемит наиболее распространенная разновидность свободного глинозема в зоне гидролиза КВ КМА. В бокситах почти всегда находится в тонко- и скрытокристаллической формах в виде плотных сплошных землистых масс в тесной ассоциации с бертьерином и каолинитом (рис. 4, а). По данным зондовых анализов химический состав бемита в бокситах КМА (табл. 2) близок к теоретическому. Отмечаются незначительные содержания SiO₂, FeO и повышенные H₂O. При увеличении количества воды в структуре бемита формируется гелеобразный псевдобемит, химическая формула которого AlOОН·nH₂O, где n = 0.3–1.0 [6].

На дифрактограммах бокситов явно выражены характерные для минерала пики базальных отражений: 6.1, 3.16, 2.35, 1.86 Å. В образцах также содержится и некоторое количество каолинита и бертьерина (см. рис. 2). Дифрактограммы бемита и псевдобемита практически совпадают. Но для последнего отмечается некоторое смещение отражений 002 и 003, а сами пики уширены [7].

Гиббсит Al(OH)₃ или Al₂O₃·3H₂O на месторождениях КМА менее распространен, чем бемит. В бокситах наблюдается в виде сплошных скрытокристаллических масс. Форма выделения разная – в бобово-пизолитовых породах чистый гиббсит присутствует в основном в виде цементирующей массы совместно с гетитом, а в бобовинах и пизолитах он находится чаще всего в ассоциации с бертьерином (рис. 4, б). Теоретический химический состав: Al₂O₃ – 65.36%, H₂O – 36.64%, для гиббсита КМА (в среднем по данным микронзондирования): 58.13% Al₂O₃; 41.87% H₂O.

Идентификация гиббсита, в том числе и в смесях с другими минералами, надежно производится рентгеновскими методами по характерным для него рефлексам: 4.85 (I = 100); 4.37 (I = 36) и 4.31 Å (I = 18). На дифрактограмме гиббсит характеризуется узкими и четкими рефлексами, что свидетельствует о его хорошей степени совершенства кристаллической структуры [8]. Обычно ассоциирует с гетитом и бертьерином.

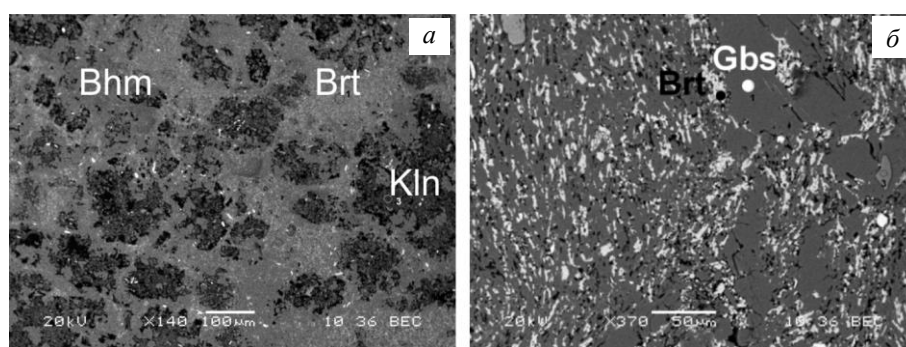


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки бокситов: *a* – каолинит-бертьерин-бемитового (Яковлевское месторождение), *б* – гиббсит с реликтами бертьерина (Ольховатское месторождение). Обозначения: Bhm – бемит, Gbs – гиббсит, Brt – бертьерин, Kln – каолинит

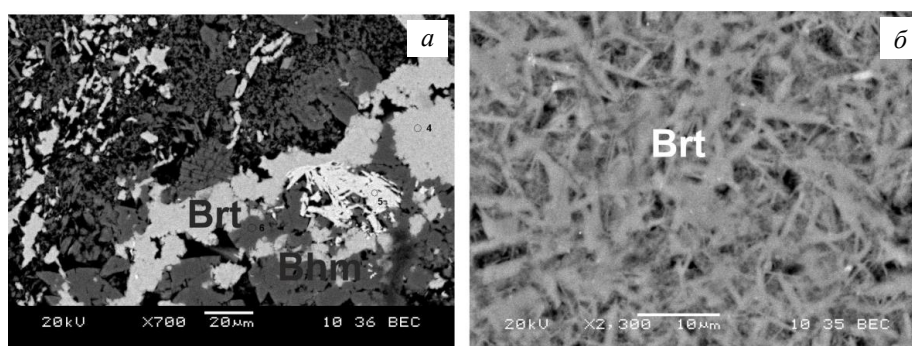


Рис. 5. Формы выделения бертьерина из бемитовых бокситов (Яковлевское месторождение): *a* – гипергенного; *б* – диагенетического

Бертьерин – моноклинный слоистый силикат из подгруппы серпентина группы каолинита-серпентина. Широко распространен в бокситах КМА и является породообразующим минералом. В большинстве предыдущих работ по КМА при его идентификации использовались термины шамозит, диагенетический хлорит, железистый хлорит и указывались физико-химические характеристики, присущие бертьерину. Установлены две его модификации – гипергенная и диагенетическая, выделенные по положению в профиле КВ и морфологическим признакам.

Гипергенный бертьерин развит в виде скрытокристаллических масс, встречающихся чаще всего в неизмененных вторичными процессами бемитовых и гиббситовых бокситах. Под оптическим микроскопом видна сплошная скрытокристаллическая масса, состоящая из смеси бертьерина с бемитом (гиббситом), каолинитом и гидроокислами железа. Выполняет прослой, иногда составляет основную массу породы. В ряде образцов под электронным микроскопом обнаружено постепенное замещение бертьерина по периметру бемитом (рис. 5, *a*) и гетитом.

Известны две структурные разновидности бертьерина – ортогональный 1Н и моноклинный 1М. Авторы работ [9] и [10] выяснили, что бертьерины с высоким содержанием Al_2O_3 чаще встречаются в типе 1М, а тип 1Н чаще развит

Табл. 3

Состав бертьерина по данным микрозондирования в бокситах КМА

Компо- ненты	№ точек зондирования, содержания компонентов в бертьерине бокситов, вес. %										
	3	3	10	10	10	10	10	1	5	11	11
SiO ₂	19.2	18.77	23.65	30.97	30.67	26.34	22.22	30.98	19.73	19.38	20.87
Al ₂ O ₃	25.69	25.61	26.61	31.5	30.92	27.54	26.72	33.37	25.64	26.34	25.12
FeO	39.8	38.58	35.63	24.51	29.4	28.41	29.08	14.45	44.89	41.41	41.21
MgO	1.64	1.59	2.62	2.15	2.1	2.54	2.92	1.59	1	1.32	1.41
Сумма	86.77	84.55	88.51	89.13	93.09	84.83	80.94	80.39	91.26	88.45	88.61
Al ₂ O ₃ / SiO ₂	1.34	1.36	1.13	1.02	1.01	1.05	1.20	1.08	1.30	1.36	1.20

Примечание: Бокситы (месторождения): 1 – существенно бемитовый, микропористый (Мелихово-Шебекинское); 3 – кавернозный бертьерит-бемитовый (Висловское); 10 – плотный бемит-бертьериновый с реликтовой текстурой (Яковлевское); 11. псевдобобовый макропористый гиббситовый (Ольховатское). Жирным шрифтом выделены анализы игольчатого диагенетического бертьерина

в образцах с низким содержанием Al₂O₃ и высоким SiO₂. По результатам исследований [1, 11] для бокситов и БЖР КМА бертьерин 1М высокоглиноземистый и малокремнистый, кремниевый модуль (Al₂O₃/SiO₂) в нем равен 1.4–1.56. В ортогональном 1Н модуль составляет 0.74–1.04. Чаще всего встречается бертьерин с неупорядоченной структурой и сочетанием моноклиальной и ортогональной политипных модификаций [1].

Химический состав бертьерина бокситов следующий: SiO₂ 17.52–30.98 мас. %, Al₂O₃ 23.5–33.37 мас. %, FeO 14.45–44.83 мас. %, MgO 0.77–1.39 мас. %. По сравнению с гипергенным бертьерином БЖР в бокситах минерал содержит большее количество Al₂O₃ и меньшее SiO₂. Кремниевый модуль бертьерина в бокситах КМА составляет 1.08–1.36 (табл. 3), следовательно, бертьерин относится к типу 1Н с различной долей модификации 1М.

На дифрактограммах бертьерин идентифицируется по основным рефлексам 7.04–7.1 Å (см. рис. 2, 3). Модификация 1М отличается пониженными значениями всех d_{00L} . Однако установление политипов бертьерина осложнено тем, что изучаемые объекты представлены тонкодисперсными смесями глиноземных, глинистых и других минералов, поэтому на дифрактограммах рефлексы разных модификаций минерала частично или полностью перекрываются. Образование гипергенного бертьерина происходит уже в зоне III за счет разложения иллита. Это объясняется распространением минерала по всему профилю, даже в его нижних частях.

Каолинит Al₄Si₄O₁₀(OH)₈ или Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O представлен двумя разновидностями: каолинитом второй стадии выветривания (иллит-каолинитовой), реликты которого обнаружены в бокситах и диагенетическим, наложенным на уже сформированные аллиты.

Макроскопически бокситы с каолинитом глиноподобные, белые, переходящие в кремовые и бледно-желтые. Реликтовый каолинит в гиббситовой массе представлен единичными пластинками размером от 25 до 50 мкм, уцелевшими в процессе латеризации. Его большая часть при латеризации перешла в гиббсит. Каолинит реликтовый отличается меньшим содержанием SiO₂ и FeO, и большим Al₂O₃ по сравнению с новообразованным. Во всех анализах диагенетического

каолинита присутствуют примеси FeO, что можно объяснить инфильтрацией из выветрелых джеспилитов. В Старооскольском рудном районе каолинит в ассоциации с иллитом является основным породообразующим минералом КВ, перекрытых девонскими отложениями.

Иллит наблюдается в чешуйчатых и тонкопластинчатых белых массах, жирных на ощупь. Он вместе с каолинитом диагностирован рентгенографическим методом в нижних горизонтах КВ сланцев Оскольского рудного района, где широко развит.

Гетит – минерал группы гидрооксидов железа с формулой $\alpha\text{-FeOOH}$ или $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Макроскопически образует землистые массы и придает бокситам жёлтый, охряно-жёлтый, жёлто-бурый, бурый цвета. Ассоциирует с гиббситом и бертьерином. В гиббситовом боксите Ольховатского месторождения гетита 10–15%. Он слагает тонкокристаллические сплошные массы, имеет концентрические формы в виде изогнутых колломорфных жилкообразных масс с двойной каемкой на периферии, с разным содержанием воды и железа.

Гидрогематит – это тонкодисперсный гематит с адсорбированной водой. Тяготеет к гидрогематит-бертьерин-бемитовым бокситам (Мелихово-Шебекинское месторождение) и придает им бордовый и бурый цвета.

Диагенетические и эпигенетические минералы. Среди первых ведущую роль занимают новообразованные каолинит, бертьерин, сидерит, сульфиды. Диагенетическая минерализация в некоторых профилях КВ достигает заметных значений с образованием каолинизированных, бертьеринизированных и сидеритизированных разновидностей пород в самых верхних частях залежей бокситов. Кальцит встречается редко, сосредоточен в кровле КВ, возникновение его связано с инфильтрационными процессами из вышележащих карбонатных толщ.

Диагенетический каолинит образуется в восстановительных условиях при обелении бокситовых толщ, формируется по бемиту, гиббситу, находится в тесной ассоциации с диагенетическим бертьерином. Представлен сплошными скрытокристаллическими массами. Он слабо раскристаллизован, гелеморфный. Размеры минерала менее 1 μm . В разных типах бокситов КМА его содержания варьируют от 10% до 50%. Местами он сконцентрирован в слойки.

Диагенетический бертьерин представлен мелкими удлиненными кристаллами (см. рис. 5, б). Они имеют размер около 1 μm и часто ассоциируют с фрамбоидами пирита. Кристаллы бертьерина образуются в порах и трещинах породы, заполняя собой свободное пространство. Резкое окончание бертьериновых кристаллов у основания, а также отсутствие замещающих текстурных связей между минералами подтверждают диагенетическое образование этого морфологического типа [12]. Ассоциирует такой бертьерин с каолинитом, бемитом и карбонатами. Диагенетический бертьерин по сравнению с сингенетическим богаче SiO_2 и MgO, содержание компонентов в нем варьирует (вес. %): Al_2O_3 26.61–31.5, FeO 24.51–35.63, SiO_2 22.22–30.97, MgO 2.1–2.92 (см. табл. 3). Значение кремниевого модуля в среднем меньше, чем у гипергенной разновидности.

Карбонаты в бокситах представлены сидеритом и кальцитом, встречаются в кровле залежей. Выполняют пустоты и трещины, а также образуют прожилки и гнездообразные скопления. Кальцит встречается редко, заполняет трещины,

где представлен полнокристаллическими агрегатами. Сидерит обычен в качестве цемента плотных руд, развит в виде тонкозернистых масс и мелкозернистых скоплений.

Пирит встречается в бемит-бертьериновых бокситах Висловского и Яковлевского месторождений. Представлен скоплениями мелких, менее 1 мкм кубов и реже октаэдров, образующих плотные скопления округлой формы – фрамбоидов. Среднее его содержание в породе 1–5%. Подобные агрегаты в бокситах формируются под воздействием бактерий [13] и получили название «бактериопирит».

Таким образом, основными минералами бокситов КМА являются бемит, гиббсит, бертьерин, каолинит, гетит и гидрогематит. Тяготение гиббситовых разновидностей бокситов к северной части Белгородского рудного района объясняется повышенным здесь рельефом, а поэтому интенсивной промываемостью профиля выветривания с образованием пизолитовых бокситов, сложенных тригидратом алюминия. Бемитовые бокситы с сохранением структур материнских пород и моногидратом алюминия формировались на более низких ступенях рельефа. Специфической особенностью минерального состава рассматриваемых бокситов является широкое развитие бертьерина, который является их главным силикатом, как и в БЖР [1].

Обсуждение результатов

Анализ структурно-текстурных особенностей, минерального состава, а также стратиграфических и палеогеографических данных времени формирования бокситов КМА, позволило установить их полигенное происхождение в несколько этапов. В додевонское (доэйфельское) время в условиях отсутствия растительности и засушливого климата [3, 4] одновременно с образованием на джеспилитах маломощных (первые метры) БЖР по межрудным сланцам формировался иллитовый профиль КВ. С живецкого времени в связи с гумидизацией климата и выходом на сушу растительности на сланцах развивался иллит-каолинитовый профиль, а мощности БЖР заметно увеличились. Аллитная зона с бокситами образовалась на межрудных сланцах в позднем турне-раннем визе только в Белгородском районе, не перекрытом морским бассейном в отличие от остальной территории КМА.

Бокситоносная КВ мощностью в десятки метров формировалась по выветрелым сланцам иллит-каолинитового состава. При этом в профиле выветривания в зонах II и III (см. табл. 1) отмечается широкое развитие бертьерина. Его появление можно объяснить большим количеством Fe в выветривающихся породах, которое в восстановительных условиях может входить в кристаллическую структуру филлосиликатов.

В IV зоне минералы глинозема образуются непосредственно по иллиту и каолиниту из более древних КВ, а также по бертьерину. Бемит развит в южной, пониженной части Белгородского рудного района, граничащего с Донецким угленосным бассейном, а гиббсит тяготеет к северной части района и формировался на повышенных участках рельефа.

Преобладающие бемитовые бокситы, как правило, сохраняют реликтовую сланцеватую текстуру материнских пород, тогда как гиббситовые представлены пизолитовыми и псевдобобовыми разновидностями, что свидетельствует о более

интенсивной проработке последних процессами выветривания и гораздо меньшем количестве промежуточных минералов, представленных каолинитом и бертьерином.

Наложенные на верхние части КВ процессы привели к заметному изменению их состава. Диагенетические процессы проявились при подтоплении бокситов водами визейских трансгрессирующих морских бассейнов и выражены в силификации и карбонатизации и образовании верхней сиаллитно-аллитной подзоны. Она сложена в основном полуторными окислами алюминия, вторичными каолинитом, бертьерином. Эпигенетические процессы привели к формированию пирита и кальцита. В образовании первого значительную роль сыграла органика из углистых глин, непосредственно перекрывающих КВ и выше переходящих в известняки.

Бертьериновые бокситы известны в других палеозойских месторождениях Восточно-Европейской платформы. На Среднем Тимане, в самом крупном Вежаю-Ворыквинском месторождении, широко развиты бертьерин-бемитовый и гематит-бертьерин-бемитовый типы бокситов [14]. Материнскими породами для выветривания служили рифейские сланцы и вулканогенно-осадочные породы девона. Бертьеринизация аллитов, развитых по глинистым образованиям, установлена для Северо-Онежской провинции [15]. Все эти бокситы формировались в сходных палеогеографических условиях в пределах приморских равнин на возвышенных участках с обильной водонасыщенностью и богатой растительностью.

Органическое вещество, с одной стороны, активизировало процессы выветривания, а с другой – повлияло на окислительно-восстановительный потенциал среды, переводя железо из трехвалентной формы в двухвалентную. Этим можно объяснить широкое развитие бертьерина (7 \AA) – филлосиликата серпентин-каолинитовой группы с чередованием триоктаэдрических и октаэдрических слоев в соотношении 1:1 и составом $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mg})_{2-3}[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_5](\text{OH})_6$. Этот минерал является породообразующим в бокситах, развитых на железосодержащем материнском субстрате.

Заключение

Проведенные исследования типов и минерального состава бокситов КМА показали, что они являются полигенетическим образованием, сформированным в несколько стадий, основная для них была латеритная. Это предопределило сложный полиминеральный состав аллитов. В них помимо гидроксидов алюминия заметную роль играют филлосиликаты и оксиды железа. Такой состав бокситов должен быть учтен при разработке способов получения алюминия. Специфическими особенностями КВ являются большая мощность подбокситовых зон и широкое распространение в профиле выветривания бертьерина.

Палеогеографические условия формирования платформенных бокситов в раннем карбоне характеризуются незначительной расчлененностью рельефа с размахом в десятки метров. Для кайнозойских латеритных покровов эта величина составляла первые сотни метров [16]. Это способствовало интенсивному выносу растворимых компонентов и образованию зоны полуторных гидроксидов, почти лишенных примесей промежуточных минералов, поэтому качество кайнозойских бокситов, как правило, гораздо выше, чем палеозойских.

Палеозойские платформенные бокситы тяготеют к прибрежным частям осадочных бассейнов, тогда как кайнозойские обычно удалены от них. По простиранию и разрезу рассмотренные нами бокситы сменялись угленосными и терригенно-карбонатными породами. Подтопление водами трансгрессирующих морских бассейнов территорий с КВ и обилие органики способствовало возникновению промежуточных минеральных фаз, ухудшающих качество бокситов.

Позднепалеозойские месторождения бокситов, в том числе и подвижных областей типа СУБР, приурочены к экваториальной зоне с влажным тропическим климатом того времени. Она протягивалась от Шотландии через Восточно-Европейскую платформу, Урал, юг Сибири и весь Китай вплоть до его юго-восточного окончания [17]. На повышенных участках этой территории в пограничных частях с угленосными бассейнами формировались своеобразные бертьериновые бокситы, пока неизвестные в более поздние времена.

Литература

1. Никулин И.И., Савко А.Д. Железорудные коры выветривания Белгородского района Курской магнитной аномалии // Тр. Науч.-исслед. ин-та геологии Воронеж. гос. ун-та. – 2015. – Вып. 85. – 102 с.
2. Железные руды КМА. / Под ред. В.П. Орлова, И.А. Шевырева, Н.А. Соколова. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. – 516 с.
3. Савко А.Д. Фанерозойские коры выветривания и связанные с ними отложения Воронежской антеклизы, их неметаллические полезные ископаемые: Дис. ... д-ра геол. мин. наук. – Воронеж, 1984. – 551 с.
4. Савко А.Д., Хожаинов Н.П. Этапы формирования кор выветривания в верхнем протерозое и палеозое Воронежской антеклизы // Литогенез в докембрии и фанерозое Воронежской антеклизы. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1975. – С. 46–59.
5. Сиротин В.И., Белявцева Е.Е. Бокситы КМА // Тр. Науч.-исслед. ин-та геологии Воронеж. гос. ун-та. – 2016. – Вып. 93. – 104 с.
6. Семенов Е.А. Разработка физико-химических основ получения наноразмерных порошков оксидов и гидроксида алюминия (бемита): Автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М., 2019. – 24 с.
7. Салтыков В.Ф. Распределение полиморфных модификаций гидроксидов алюминия в аллофан-гипбситовых породах Поволжья // Литология и полезные ископаемые. – 2009. – № 4. – С. 374–383.
8. Пуцаровский Д.Ю. Рентгенография минералов. – М.: Геоинформмарк, 2000. – 292 с.
9. Brindley G.W. Chemical compositions of berthierines – A review // Clays Clay Miner. – 1982. – V. 30. – P. 153–155. – doi: 10.1346/CCMN.1982.0300211.
10. Bailey S.W. Structures and composition of other trioctahedral 1:1 phyllosilicates // Rev. Mineral. Geochem. – 1988. – V. 19, No 1. – P. 169–188.
11. Клекль В.Н., Никитина А.П., Талько Ю.К. Минералого-технологические особенности латеритных бокситов КМА // Кора выветривания: Сб. ст. – М.: Наука, 1991. – Вып. 20. – С. 157–165.
12. Damyanov Z., Vassileva M. Authigenic phyllosilicates in the Middle Triassic Kremikovtsi sedimentary exhalative siderite iron formation, Western Balkan, Bulgaria // Clays Clay Miner. – 2001. – V. 49. – P. 559–585. – doi: 10.1346/CCMN.2001.0490607.
13. Бардоши Д. Карстовые бокситы. – М.: Мир, 1981. – 447 с.

14. Вахрушев А.В., Лютое В.П., Силаев В.И. Кристаллохимические особенности железистых минералов в бокситах Вежаю-Ворыквинского месторождения (Средний Тимман) // Вестн. Ин-та геол. Коми НЦ УрО РАН. – 2012. – № 10. – С. 14–18.
15. Сиротин В.И., Белявцева Е.Е. О соотношении промывного и проточного гидролиза в образовании бокситов (на примере КМА Северной Онеги) // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2008. – № 2. – С. 44–53.
16. Михайлов Б.М., Куликова Г.В. Фациальный анализ кор выветривания. – Л.: Недра, 1977. – 159 с.
17. Зинчук Н.Н., Савко А.Д., Шевырев Л.Т. Историческая минерагения: в 3 т. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2005. – Т. 1: Введение в историческую минерагению. – 587 с.; 2007. – Т. 2: Историческая минерагения древних платформ. – 570 с.; 2008. – Т. 3: Историческая минерагения подвижных суперпоясов. – 622 с.

Поступила в редакцию
30.04.2020

Савко Аркадий Дмитриевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры исторической геологии и палеонтологии

Воронежский государственный университет
Университетская пл., д. 1, г. Воронеж, 394018, Россия
E-mail: savko@geol.vsu.ru

Овчинникова Марина Юрьевна, аспирант кафедры исторической геологии и палеонтологии

Воронежский государственный университет
Университетская пл., д. 1, г. Воронеж, 394018, Россия
E-mail: ovchinnikova@geol.vsu.ru

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2020, vol. 162, no. 2, pp. 274–289

doi: 10.26907/2542-064X.2020.2.274-289

The Main Types and Mineral Composition of Bauxites of the Kursk Magnetic Anomaly

A.D. Savko*, M.Yu. Ovchinnikova**

Voronezh State University, Voronezh, 394018 Russia
E-mail: *savko@geol.vsu.ru, **iovchinnikova@geol.vsu.ru

Received April 30, 2020

Abstract

The bauxite-bearing Paleozoic weathering crust of the Kursk Magnetic Anomaly (KMA) is developed along the inter-ore schists of the ferruginous-siliceous formation of the Kursk series. In the banded iron formations, the weathering crust is represented by high-grade iron ores forming a series of deposits with bauxites. They are confined to the ridges of banded iron formations, which tower up in the relief of the Precambrian and are overlain by a thick layer of sediments. The recently obtained rock material studied with the use of precision methods enabled a significant refinement and adjustment of the existing ideas about KMA bauxites. Based on their texture, structure, and mineral composition, the following five main types were singled out: 1 – finely porous substantially boehmite, 2 – macroporous berthierine-boehmite, 3 – stony hydrohematite-berthierine-boehmite, 4 – massive berthierine-kaolinite-boehmite,

5 – pseudo-bean substantially gibbsite and berthierine-gibbsite. Mostly gibbsite varieties gravitate toward the northern part of the Belgorod ore region, while boehmite varieties are more abundantly distributed in its southern part. The main bauxite minerals are boehmite, gibbsite, berthierine, and kaolinite; the minor ones are illite, hematite (hydrohematite), quartz, goethite, chamosite, pyrite, carbonates, and accessories. They formed in several stages. In the pre-Devonian (pre-Eifel) time, an illite weathering crust formed along the inter-ore schists. Since the Givetian time, an illite-kaolinite profile has been developing due to the climate humidization and the emergence of terrestrial vegetation. Laterites with bauxite appeared in the Early Carboniferous and only in the Belgorod region of the KMA, because the latter was not blocked by the sea basin, unlike the rest of the territory. The processes superimposed on the weathering crust led to silicification and carbonation of the uppermost parts of the bauxite section.

Keywords: Kursk Magnetic Anomaly, bauxites, weathering crust, gibbsite, boehmite, berthierine, kaolinite

Figure Captions

- Fig. 1. The layout of the deposits of banded iron formations and bauxites. According to [1]. 1 – weathering crusts in the banded iron formations and shales; 2 – exposure of banded iron formations to the Precambrian surface with a thin (up to 10 m) weathering crust. Rocks: 3 – Oskol series; 4 – Stoilenskaya suite of the Kursk series; 5 – Archean; 6 – Shebekinsky syenites; 7 – granites of the Ataman complexes; 8 – tectonic disturbances.
- Fig. 2. Varieties of bauxites and their diffraction patterns: *a* – substantially boehmite microporous bauxite with kaolinite (Melikhovo-Shebekinsky deposit); *b* – berthierine-kaolinite-boehmite bauxite (Vislovskoye deposit).
- Fig. 3. Varieties of bauxites and their diffraction patterns: *a* – dense boehmite-berthierine-kaolinite banded bauxite with relic texture (Yakovlevskoe deposit); *b* – brown stony hydrohematite-berthierine-boehmite bauxite (Melikhovo-Shebekinsky deposit).
- Fig. 4. SEM images of bauxites: *a* – kaolinite-berthierine-boehmite (Yakovlevskoe deposit), *b* – gibbsite with berthierine relics (Olkhovatskoye deposit). Designations: Bhm – boehmite, Gbs – gibbsite, Brt – berthierine, Kln – kaolinite.
- Fig. 5. Forms of berthierine isolation from boehmite bauxites (Yakovlevskoe deposit): *a* – hypergenic; *b* – diagenetic.

References

1. Nikulin I.I., Savko A.D. Iron-ore weathering crusts of the Belgorod region of the Kursk Magnetic Anomaly. *Tr. Nauchno-Issled. Inst. Geol. Voronezh. Gos. Univ.*, 2015, vol. 85. 102 p. (In Russian)
2. *Zheleznye rudy KMA* [Iron Ores of the Kursk Magnetic Anomaly]. Orlov V.P., Shevyrev I.A., Sokolov N.A. Moscow, ZAO “Geoinformmark”, 2001. 516 p. (In Russian)
3. Savko A.D. The Phanerozoic weathering crusts and related deposits of the Voronezh anteclise, their nonmetallic minerals. *Doct. Geol.-Mineral. Sci. Diss. Voronezh*, 1984. 551 p. (In Russian)
4. Savko A.D., Khozhainov N.P. Stages of weathering crust formation in the Upper Proterozoic and Paleozoic of the Voronezh anteclise. In: *Litogenez v dokembrii i fanerozoe Voronezhskoi anteklizy* [Lithogenesis in the Precambrian and Phanerozoic of the Voronezh Anteclise]. Voronezh, Izd. Voronezh. Univ., 1975, pp. 46–59. (In Russian)
5. Sirotn V.I., Belyavtseva E.E. Bauxites of the Kursk Magnetic Anomaly. *Tr. Nauchno-Issled. Inst. Geol. Voronezh. Gos. Univ.*, 2016, no. 93. 104 p. (In Russian)
6. Semenov E.A. Development of physicochemical principles for the production of nanosized powders of aluminum oxides and hydroxide (boehmite). *Extended Abstract of Cand. Chem. Sci. Diss. Moscow*, 2019. 24 p. (In Russian)
7. Saltykov V.F. Distribution of polymorphs of aluminum hydroxides in the allophane-gibbsite rocks of the Volga region. *Lithol. Miner. Resour.*, 2009, vol. 44, no. 4, pp. 339–347. doi: 10.1134/S0024490209040038.
8. Pushcharovskii D.Yu. *Rentgenografiya mineralov* [X-Ray Analysis of Minerals]. Moscow, Geoinformmark, 2000. 292 p. (In Russian)
9. Brindley G. W. Chemical compositions of berthierines – A review. *Clays Clay Miner.*, 1982, vol. 30, pp. 153–155. doi: 10.1346/CCMN.1982.0300211.

10. Bailey S. W. Structures and composition of other trioctahedral 1:1 phyllosilicates. *Rev. Mineral. Geochem.*, 1988, vol. 19, no. 1, pp. 169–188.
11. Klekl' V.N., Nikitina A.P., Tal'ko Yu.K. Mineralogical and technological features of lateritic bauxites of the Kursk Magnetic Anomaly. In: *Kora vyvetrivaniya* [Weathering Crust]. Moscow, Nauka, 1991, no. 20, pp. 157–165. (In Russian)
12. Damyanov Z., Vassileva M. Authigenic phyllosilicates in the Middle Triassic Kremikovtsi sedimentary exhalative siderite iron formation, Western Balkan, Bulgaria. *Clays Clay Miner.*, 2001, vol. 49, pp. 559–585. doi: 10.1346/CCMN.2001.0490607.
13. Bardoshi D. *Karstovye boksity* [Karst Bauxites]. Moscow, Mir, 1981. 447 p. (In Russian)
14. Vakhrushev A.V., Lyutoev V.P., Silaev V.I. Crystal-chemical features of ferrous minerals in bauxite of the Vezhayu-Vorykvinskoe deposit (Middle Timan). *Vestn. Inst. Geol. Komi Nauchn. Tsentr Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2012, no. 10, pp. 14–18. (In Russian)
15. Sirotin V.I., Belyavtseva E.E. On the ratio of washing and flow hydrolysis in the formation of bauxites (using the Kursk Magnetic Anomaly of the North Onega as an example). *Vestn. Voronezh. Gos. Univ. Ser.: Geol.*, 2008, no. 2, pp. 44–53. (In Russian)
16. Mikhailov B.M., Kulikova G.V. *Fatsial'nyi analiz kor vyvetrivaniya* [Facies Analysis of Weathering Crusts]. Leningrad, Nedra, 1977. 159 p. (In Russian)
17. Zinchuk N.N., Savko A.D., Shevyrev L.T. *Istoricheskaya minerageniya* [Historical Minerageny]. Voronezh, Voronezh. Gos. Univ. Vol. 1: Introduction to historical minerageny. 2005. 587 p.; Vol. 2: Historical minerageny of ancient platforms. 2007. 570 p.; Vol. 3: Historical minerageny of mobile superbelt. 2008. 622 p. (In Russian)

⟨ **Для цитирования:** Савко А.Д., Овчинникова М.Ю. Основные типы и минеральный состав бокситов Курской магнитной аномалии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2020. – Т. 162, кн. 2. – С. 274–289. – doi: 10.26907/2542-064X.2020.2.274-289. ⟩

⟨ **For citation:** Savko A.D., Ovchinnikova M.Yu. The main types and mineral composition of bauxites of the Kursk Magnetic Anomaly. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 2, pp. 274–289. doi: 10.26907/2542-064X.2020.2.274-289. (In Russian) ⟩