

УДК 553.068.36.553.31:550.46:553.492(470.324)

## ИСТОРИКО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД И СВЯЗАННЫХ С НИМИ БОКСИТОВ КУРСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ (РОССИЯ)

© 2022 г. А. Д. Савко<sup>а</sup>, \*, И. И. Никулин<sup>б</sup>,  
М. Ю. Овчинникова<sup>а</sup>, Н. М. Боева<sup>с</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Воронежский государственный университет,  
Университетская площадь, 1, Воронеж, 394018 Россия  
<sup>б</sup>ООО “НорНикель Технические Сервисы” (ООО “НН ТС”),  
Гражданский просп., 11, Санкт-Петербург, 195220 Россия

<sup>с</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: asavko@geol.vsu.ru

\*\*e-mail: boeva@igem.ru

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

После доработки 10.09.2021 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

Богатые железные руды и бокситы Курской магнитной аномалии (КМА) образовались в корях выветривания на породах сланцево-джеспилитовой формации раннего докембрия. До сих пор коры выветривания на джеспилитах и на сланцах рассматривались отдельно, хотя в каждом рудном районе они формировались одновременно и представляют единую толщу. Поэтому большой интерес представляет сопоставление разновозрастных кор выветривания на породах рассматриваемой формации для комплексного прогноза богатых железных руд и бокситов. Результаты исследования показали, что железные руды на джеспилитах формировались во все этапы корообразования, и в палеозое их можно прогнозировать на всей территории КМА, тогда как бокситы образовались на межрудных сланцах, только на юго-западном крыле аномалии.

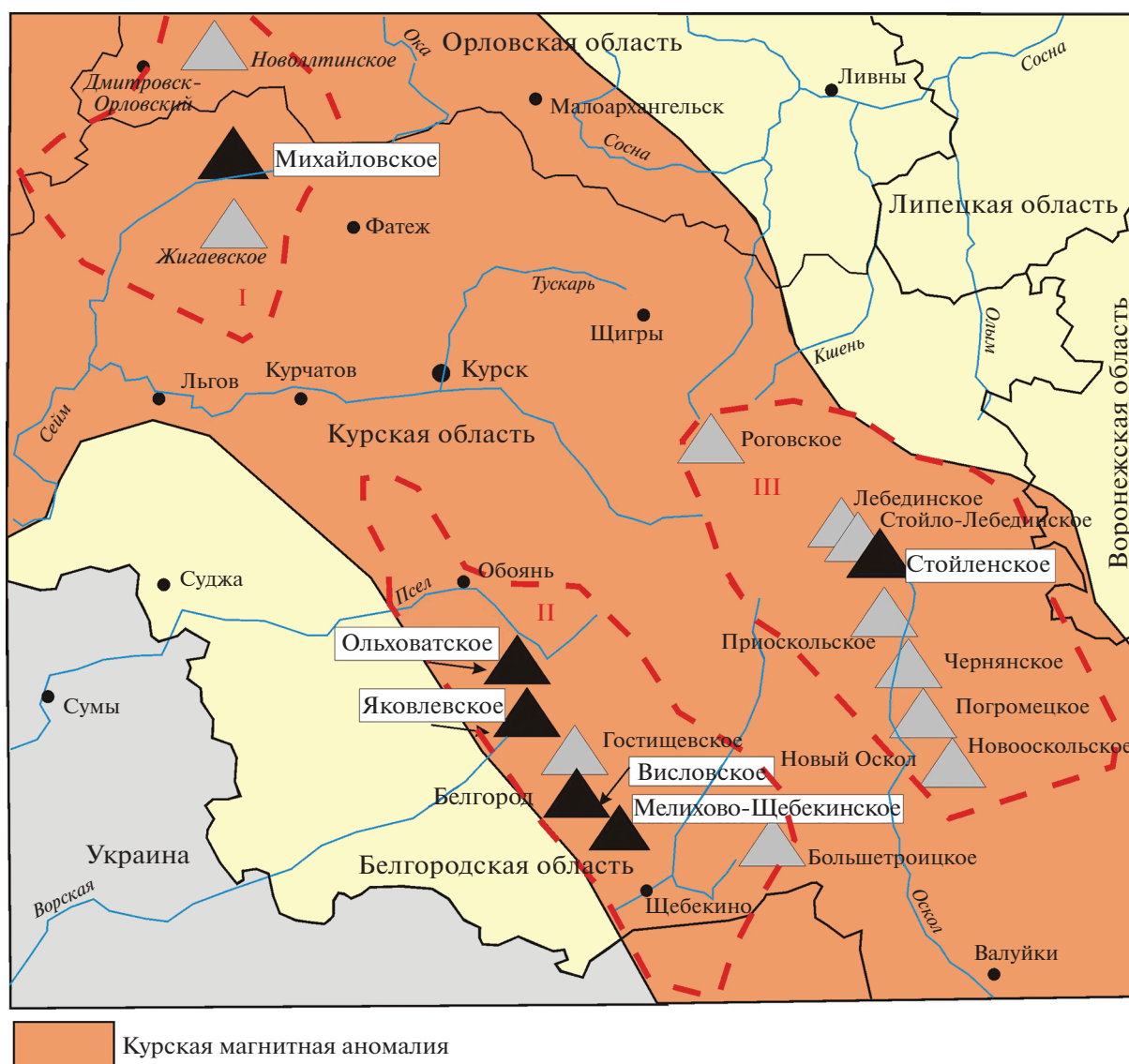
*Ключевые слова:* Курская магнитная аномалия, коры выветривания, богатые железные руды, бокситы, магнетит, мартит, гематит, бемит, гиббсит.

DOI: 10.31857/S0024497X22040061

Курская магнитная аномалия (КМА) является крупнейшей железорудной провинцией, включающей десятки месторождений железистых кварцитов; она приурочена к западной части Воронежской антеклизы – крупной положительной структуры в центральной части Русской платформы. В пределах КМА разведано 68 крупных месторождений джеспилитов [Железные руды КМА, 2001], многие из которых образуют богатые железные руды (БЖР) в коре выветривания (КВ). Выделяются две полосы развития БЖР – северо-восточная и юго-западная, а также три рудных района – Михайловский, Оскольский и Белгородский (рис. 1). К последнему приурочены наиболее крупные месторождения БЖР, бокситы и железоалюминиевые руды. Месторождения расположены в поле развития сланцево-джеспилитовой формации раннего протерозоя, выполняющей синклинальные структуры в архейских гнейсах. Породы этой формации залегают суб-

вертикально и слагают возвышающиеся в рельефе докембрия вытянутые гряды шириной до первых километров, перекрытые осадочным чехлом мощностью от 60 до 500 м и более.

На железистых кварцитах и межрудных сланцах в течение палеозоя образовались разновозрастные КВ различной мощности и состава [Савко, Хожаинов, 1975; Савко, 1984]. На джеспилитах развиты БЖР, на сланцах – иллитовые, каолинитовые и латеритные коры в зависимости от времени их образования и положения в рельефе [Никулин и др., 2015; Никулин, Савко, 2015; Сиротин, Белявцева, 2016; Савко, Овчинникова, 2020]. До сих пор КВ на джеспилитах (БЖР) и на сланцах рассматривались отдельно, хотя в каждом рудном районе они формировались одновременно и представляют единую толщу. Поэтому большой интерес представляет сопоставление разновозрастных КВ на породах рассматриваемой



**Рис. 1.** Схема расположения основных железорудных и бокситовых месторождений КМА.

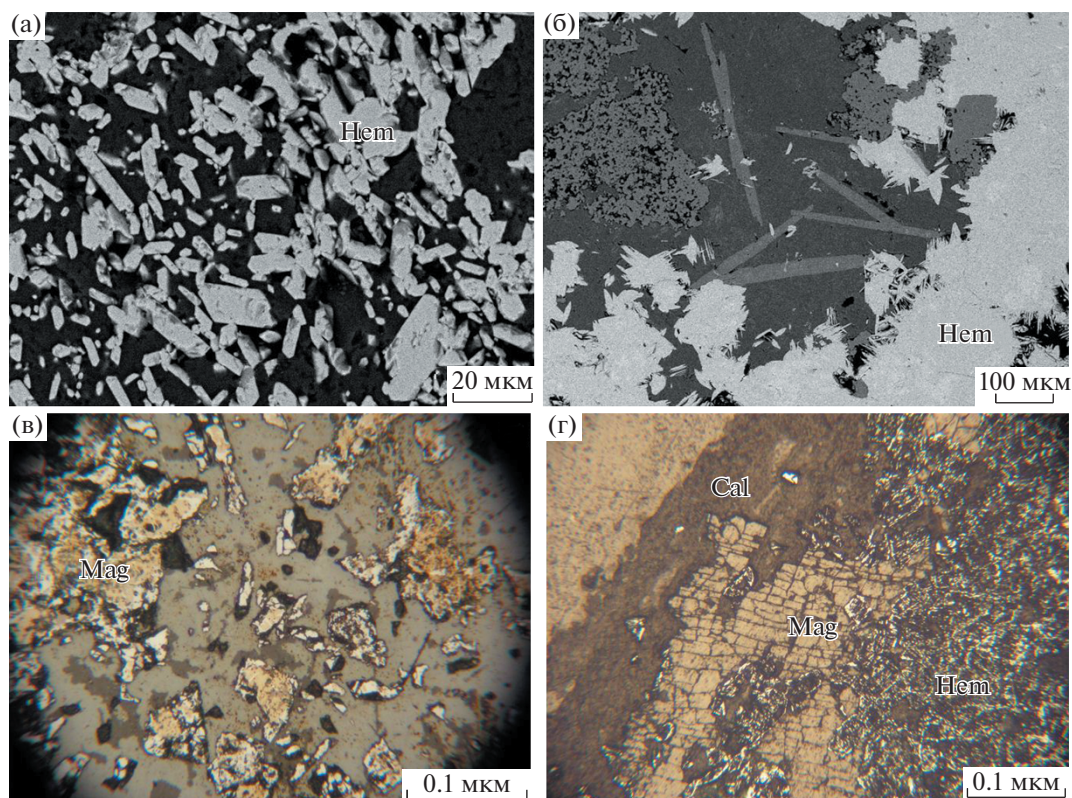
I – Михайловский рудный район; II – Белгородский; III – Оскольский. Черным треугольником отмечены месторождения, где отобраны пробы.

формации для комплексного прогноза БЖР и бокситов.

### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Настоящая работа базируется на результатах, полученных авторами в течение многолетних исследований каменного материала, отобранного из керна скважин и стенок карьеров месторождений БЖР и бокситов КМА (более 200 образцов). Выбранные объекты наиболее полно отражают строение разных по морфологии и времени формирования КВ, а также все типы БЖР и бокситов рассматриваемого региона.

Проводилось макроскопическое описание пород. Были построены литологические колонки, разрезы и карты КВ, развитых на железистых кварцитах и бокситах КМА. Лабораторная обработка образцов включала: 1 – изготовление и описание прозрачно-полированных шлифов и аншлифов образцов руд, для рыхлых разностей изготавливались искусственные шлифы на основе эпоксидной смолы; 2 – электронно-микроскопические исследования проводились на растровом сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) марки Jeol 6380LV; 3 – рентгеноспектральный анализ элементного состава в различных точках каждого из образцов выполнен с помощью системы микроанализа INCA 250; 4 –



**Рис. 2.** Формы гипогенных минералов.

а, б – электронно-микроскопические снимки железной слюдки (а – пластинчатая, б – “ежиковая” формы, оба – Яковлевское месторождение); в, г – фото аншлифов магнетита (в – крупные остатки, Стойленское месторождение, г – реликтовые включения в мартите, Яковлевское месторождение). Здесь и далее обозначения минералов даны по [Whitney, Evans, 2010]: Cal – кальцит, Mag – магнетит, Hem – гематит, Brt – бертьерин, Gth – гетит, Sd – сидерит.

минеральный состав проб изучен методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате изучения прецизионными методами минерального состава КВ на джеспилитах (БЖР) и сланцах, установлены типоморфные особенности минералов, слагающих эти два различных типа коры, и условия их образования. Были диагностированы следующие минералы: железная слюдка, мартит, магнетит, кварц, гидрогематит, гетит, гидрогетит, бертьерин, шамозит, сидерит, кальцит, пирит.

**Железная слюдка** – слюдоподобная разновидность гематита, которая представлена идиоморфными чешуйками и тонкими пластинками размером 0.01–0.03 мм (рис. 2а), и слагает до 60–80% объема железослюдковых и железослюдково-мартитовых руд, в подчиненных количествах она часто присутствует в мартитовых рудах. Железная слюдка и мартит часто развиваются вместе и образуют тонкие прослойки, согласные с реликтовой слоистостью кварцитов. Оба минерала обла-

дают сильным металлическим блеском с характерным синеватым оттенком. Цвет кристаллов и плотных масс – от серо-стального до тусклого серо-черного, у рыхлых разновидностей – до красно-бурого. Структура прослоев, обогащенных железной слюдкой – лепидобластовая, а в случае присутствия в них мартита – гранолепидобластовая. Часто железная слюдка образует “ежиковые” структуры, в которых расположена перпендикулярно граням мартита, развитого по магнетиту (см. рис. 2б). В КВ железная слюдка устойчива, и лишь в верхах разрезов элювия края пластинок бывают замещены гидроксидами железа.

**Магнетит** является основным минералом в БЖР Оскольского и Михайловского рудных районов, где образует крупные скопления и рудные залежи (см. рис. 2в). В месторождениях Белгородского района он присутствует в небольших количествах, в виде сильно корродированных мелких реликтов различной формы в мартите (см. рис. 2г).

**Кварц** ограниченно развит и встречается только в основании залежей БЖР в виде тонких “изъеденных” зерен маршаллита. Выше в результате глубоких химических преобразований в КВ, агрегаты кварца подверглись практически полному

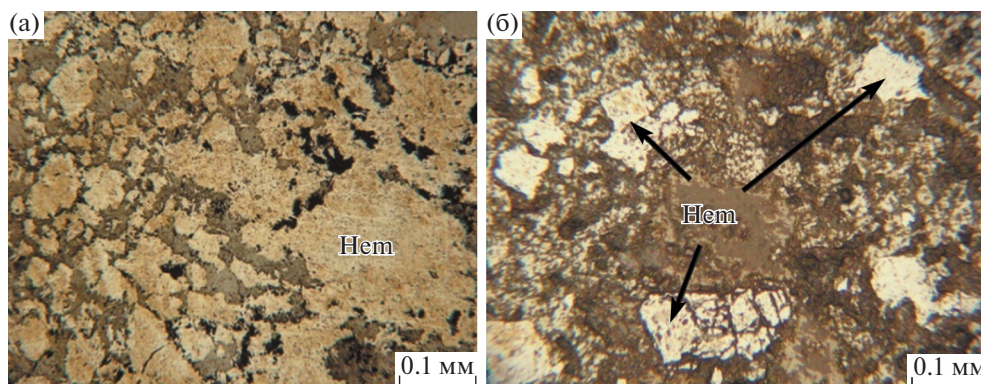


Рис. 3. Гематит в виде мартита в богатых железных рудах Яковлевского (а) и Стойленского (б) месторождений, аншлифы. Темные пятнышки на светлых пластинках мартита – реликты магнетита.

замещению или растворению. Его присутствие устанавливается по основному рефлексу  $3.34 \text{ \AA}$  на дифрактограммах.

**Мартит**, представляющий собой псевдоморфозы гематита по магнетиту, является одним из главных рудных минералов богатых железных руд КМА. Он практически целиком слагает мартитовые руды (рис. 3а) и занимает до 40–60% объема остальных руд, в которых образует тонкие (от 1–2 мм до 2–3 см) прослойки. Интенсивность мартитизации уменьшается сверху-вниз в разрезе КВ (БЖР) на джеспилитах. В нижних частях рудных тел процесс чаще всего не закончен, и мартит здесь развит в виде каймы вокруг реликтов гипогенного магнетита. Окисление магнетита в КВ происходило с сохранением его остаточных кристаллов (0.02–0.1 мм) в сплошных рудных массах (см. рис. 3б).

**Гематит**. Минерал серого или серовато-синего цвета. При наблюдении в оптическом микроскопе, в его зернах и в сростках наблюдаются коричневатые в отраженном свете реликты магнетита. Гематит (включая мартит и железную слюдку) диагностируется оптическими методами и методом рентгенофазового анализа (рефлексы  $3.67 \text{ \AA}$ ,  $2.69 \text{ \AA}$ ,  $2.51 \text{ \AA}$ ,  $2.21 \text{ \AA}$ ,  $1.83 \text{ \AA}$ ,  $1.69 \text{ \AA}$ ,  $1.49 \text{ \AA}$  на дифрактограммах) (рис. 4).

**Гидрогематит** является продуктом разложения силикатов исходных железистых кварцитов, а в верхних частях залежей может развиваться по мартиту. Гидрогематит образует землистые массы буровато-красного цвета, но развит не так широко, как другие железистые минералы КВ. На дифрактограммах он практически не отличается от гематита.

**Гетит** характеризуется желтым цветом или желто-бурыми тонами окраски, слагает натечные концентрические образования (рис. 5); обычно связан постепенными переходами с другими оксидами и гидроксидами железа. При наблюдении

в отраженном свете при увеличениях более чем в 20 раз дает внутренние рефлексы коричневого цвета. Наиболее надежно диагностируется по рентгенограммам (см. рис. 4а, б). В нижних горизонтах профиля КВ гетит развивается по железистым силикатам, в верхней части – по железной слюдке и мартиту.

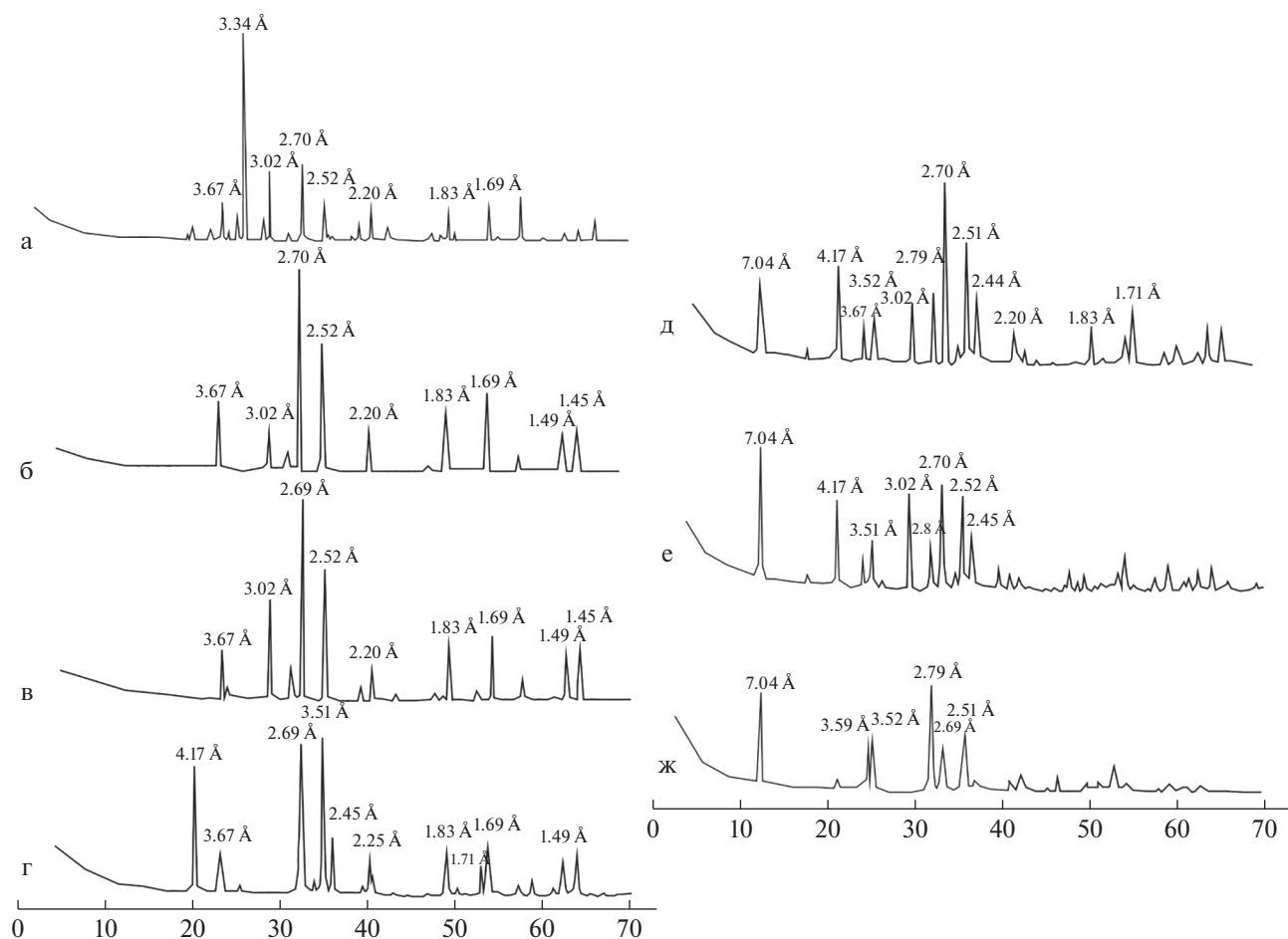
**Гидрогетит** встречается в виде охристо-желтых, желто-бурых землистых масс или хлопьевидных образований. В отраженном свете минерал светло-серый, изотропный, дает внутренние рефлексы желтого до бурого цветов, в отличие от коричневых гетита.

**Бертьерин** ( $\text{Fe}^{2+}\cdot\text{Fe}^{3+},\text{Al}$ )<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> представлен гипергенной и диагенетической разновидностями. Первая появляется уже в нижних частях профиля выветривания в полосчатых БЖР и ассоциирует с мартитом. На дифрактограммах бертьерин, независимо от происхождения, в смеси с другими минералами идентифицируется по основным значениям рефлексов:  $7.04 \text{ \AA}$ ,  $3.51 \text{ \AA}$ ,  $2.51 \text{ \AA}$ ,  $2.13 \text{ \AA}$ ,  $2.67 \text{ \AA}$ ,  $2.39 \text{ \AA}$  (см. рис. 4).

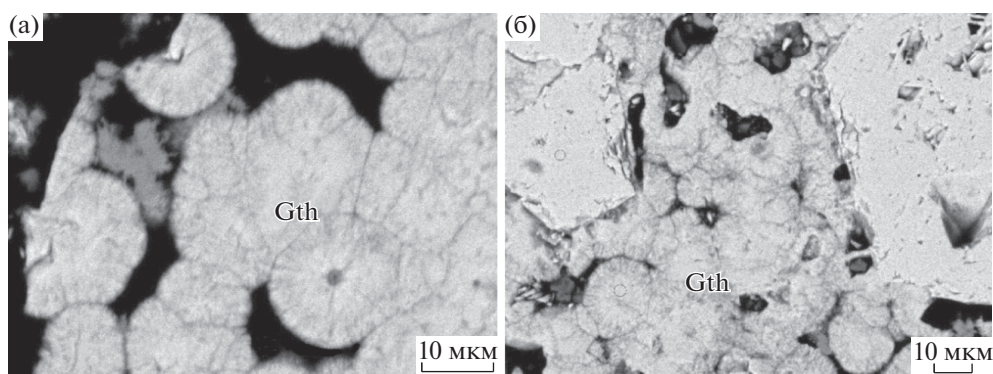
Руды с гипергенным бертьерином серовато-зеленые, легко разрыхляющиеся. В БЖР бертьерин появляется в прослоях, насыщенных мартитом, вместе с гетитом и сидеритом, причем гетит развивается по краям бертьерина (рис. 6). В минерале  $\text{Al}_2\text{O}_3$  отмечен в пределах 16.61–27.51 мас. %,  $\text{SiO}_2$  22.56–27.04 мас. %,  $\text{FeO}$  36.4–43.94 мас. % и  $\text{MgO}$  до 1.69 мас. % (табл. 1).

Все бертьерины из БЖР по значению кремниевого модуля относятся к типу 1Н. В бертьеринах этого типа пониженное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и они тяготеют к КВ и осадочным породам, в то время как бертьерины типа 1 М чаще образуются в диагенетических и гидротермальных процессах [Никулин, 2013, 2014].

Диагенетический бертьерин ассоциирует с карбонатами и пиритом, заполняет поры и трещины, а также присутствует в качестве цемента в



**Рис. 4.** Дифрактограммы разновидностей БЖР исследованных месторождений: а, б – железнослюдяково-мартитовой (а – Яковлевское, б – Стойленское), в – мартит-гидрогематитовой (Стойленское), г – гетит-гидрогематитовой (Яковлевское), д – гидрогематит-гетитовой (Стойленское), е – карбонатизированной гетит-гидрогематитовой (Яковлевское), ж – бертьеринизированной мартитовой (Стойленское).



**Рис. 5.** Микрофотографии (СЭМ) агрегатов гетита (Яковлевское месторождение).

скальных разновидностях руд. Этот минерал наблюдается в виде бледно-зеленых слюдястых масс. В образцах руд Яковлевского месторождения он представлен микрокристаллической массой (рис. 7), которая заполняет поры и не контак-

тирует с зернистой основной массой руды, что указывает на его образование после основной минеральной матрицы.

В химическом составе диагенетического бертьерина (см. табл. 1, обр. 4) содержание FeO

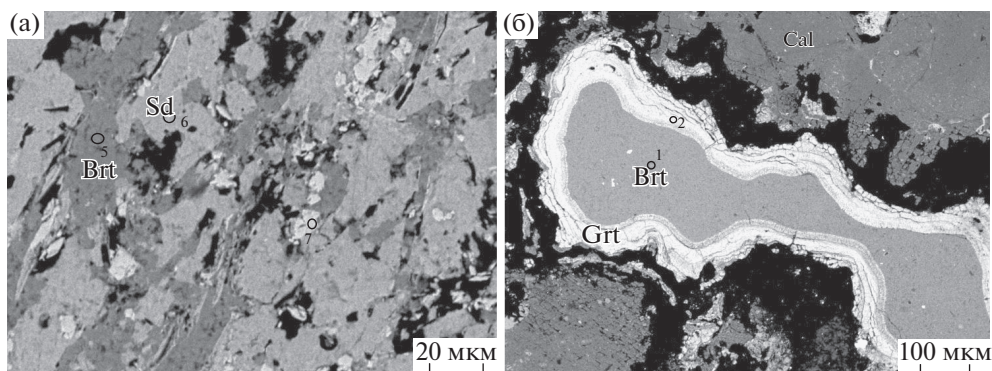


Рис. 6. Гипергенный бертьерин в мартит-гидрогематитовых рудах Яковлевского месторождения (а) и замещение бертьерина гетитом в гетит-гидрогематитовых рудах Стойленского месторождения (б). Микрофотографии в СЭМ.

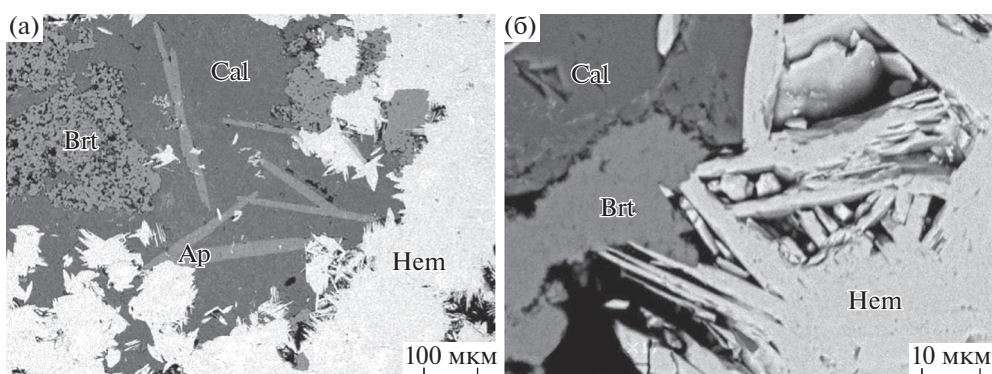


Рис. 7. Диагенетический бертьерин в карбонатизированной руде Яковлевского месторождения. Микрофотографии в СЭМ.

повышенное и отсутствует MgO. Бертьерин такого состава относится к Fe-бертьерину и описан в работах [Fritz, Toth, 1997]. Во время интенсивного химического выветривания щелочные и щелочноземельные элементы удалялись из исходного субстрата в составе растворов, оставаясь только в

устойчивых минералах, где были связаны с Fe, Al, диоксидом кремния и титаном.

**Шамозит**  $(Fe_3Al)AlSi_3O_{10}(OH)_8$  обнаружен в богатых железных рудах Стойленского месторождения, он характеризуется зеленой окраской и цементирует зерна мартита, образуя крепкие “ка-

Таблица 1. Химический состав (%) бертьерина в богатых железных рудах по данным рентгено-спектрального анализа

Компоненты	Яковлевское месторождение					Стойленское месторождение							
	2	2	2	3	4	6с	6с	6с	8с	8с	8с	8с	8с
SiO <sub>2</sub>	24.2	4.0	24.2		<b>26.4</b>	24.2	23.2	25.5	24.0	22.5	26.8	23.8	27.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.2	17.0	16.6	17.1	<b>16.6</b>	19.0	19.7	22.3	21.0	18.5	22.5	20.2	20.7
FeO	37.7	36.0	37.3	39.0	<b>43.8</b>	37.5	39.7	43.7	43.5	43.9	39.5	38.4	39.6
MgO	1.61	1.3	1.37	1.19	—	1.4	1.54	1.69	1.3	1.59	1.72	1.3	1.43
Сумма	80.8	79.0	79.5	82.8	<b>86.8</b>	82.2	84.2	93.3	89.9	86.6	90.6	83.8	88.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.71	0.7	0.68	0.67	<b>0.63</b>	0.79	0.85	0.88	0.87	0.82	0.84	0.85	0.77

Примечание. Руды: 2 – гетит-гидрогематитовая, 3 – мартит-гидрогематитовая, 4 – карбонатизированная гетит-гидрогематитовая; 6с – мартит-гидрогематитовая, 8с – гетит-гидрогематитовая. Жирным шрифтом выделен анализ диагенетического бертьерина.

менистые” руды. В верхней части профиля КВ по шамозиту развиваются оксиды железа. Этот минерал, по-видимому, может быть диагенетическим, поскольку встречается в ассоциации с сидеритом и сульфидами железа.

**Сидерит** слагает цемент плотных руд в верхних частях залежей и образует различные по размерам и формам минеральные агрегаты – от микрокристаллических скоплений неправильной формы до крупных идиоморфных кристаллов. Образованию и кристаллизации сидерита способствуют восстановительные условия диагенеза.

**Кальцит** приурочен, как правило, к кровле КВ; мелкозернистые агрегаты выполняют полости, трещины и поры в железных рудах. Характер взаимоотношений кальцита с минералами БЖР свидетельствует об его более позднем, эпигенетическом происхождении. Образование кальцита было связано с поступлением инфильтрационных вод из вышележащей карбонатной толщи каменноугольного возраста, перекрывающей БЖР.

**Пирит** латунно-желтой и золотисто-желтой окраски тяготеет к кровле БЖР, образует идиоморфные кристаллы (0.01–1 мм) с квадратными и шестиугольными сечениями (кубические и октаэдрические, осложненные гранями куба и/или пентрагондодекаэдра) и встречается в виде сплошной массы, цементирующей другие минералы железа. Он также широко распространен и в перекрывающих, особенно углистых породах (переслаивание песков, алевритов, глин, углей) в основании карбонатной толщи [Савко, 2002].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установлено, что минеральный состав БЖР полигенетический. Минералообразование происходило в несколько этапов. Главными минералами руд являются: 1 – гипогенные, унаследованные от материнских пород, 2 – образованные в результате выветривания джеспилитов, 3 – диагенетические, образовавшиеся при погружении КВ в условиях гидроморфного режима; 4 – эпигенетические, связанные с инфильтрацией растворов из перекрывающей карбонатной толщи в КВ. К гипогенным минералам относятся магнетит, железная слюдка (слюдopodobная разновидность гематита) и кварц. Гипергенные минералы включают мартит, образованный за счет окисления магнетита, а также оксиды и гидрооксиды железа (гетит, гидрогетит, гидрогематит) и бертьерин. В процессах диагенеза и эпигенеза образовались игольчатый бертьерин, шамозит, сидерит, кальцит, пирит.

В бокситоносных КВ, развитых по межрудным сланцам, также выделяются гипогенные, гипергенные, диагенетические и эпигенетические минералы. К гипогенным относятся гематит и

кварц; к гипергенным – бемит, гиббсит, бертьерин, иллит, каолинит, гетит, гидрогематит; к диагенетическим – новообразованные каолинит, бертьерин, шамозит, сидерит, пирит; к эпигенетическим – кальцит и сидерит.

Как показано выше, основными минералами БЖР являются мартит, железная слюдка, гидроксиды железа, магнетит и бертьерин. Магнетит широко развит в БЖР Михайловского, меньше Оскольского рудных районов; в виде редких реликтов он присутствует в маргитах Белгородского рудного района. Гипергенный бертьерин формировался за счет силикатов исходных пород, а затем переходил в гетит. Предполагается, что образование гипергенного бертьерина происходило в результате выветривания железосодержащих силикатов исходных джеспилитов, уже на стадии гидролиза.

Сингенетический бертьерин БЖР формировался по высокожелезистым породам в результате осаждения непосредственно из растворов, циркулировавших в КВ. В диагенезе и на эпигенетической стадии руды были сцементированы новообразованными бертьерином, сидеритом и шамозитом, а трещины и расколы заполнялись карбонатами и сульфидами. В Михайловском рудном районе основная масса БЖР сложена мартитом, железной слюдкой и магнетитом, редко встречаются гидрооксиды железа. В Оскольском районе зона мартитизации имеет большую мощность, и остаточный магнетит встречается значительно реже. Здесь плотные руды существенно преобладают над рыхлыми, что объясняется широким развитием эпигенетических и диагенетических процессов. Интенсивная проработанность экзогенными процессами КВ в Белгородском рудном районе, обусловлена благоприятным для формирования латеритного профиля теплым влажным климатом и активным участием в этих процессах органического вещества [Меркушова, Жегалло, 2019].

В бокситоносных КВ, сформировавшихся по межрудным сланцам, выделяются гипогенные, гипергенные, диагенетические и эпигенетические минералы [Савко, Овчинникова, 2020]. К первым относятся гематит и кварц; вторым – бемит, гиббсит, бертьерин, иллит, каолинит, гетит, гидрогематит; третьим – новообразованные каолинит, бертьерин, шамозит, сидерит, сульфиды, и к последним – кальцит и сидерит.

Преимущественно гиббситовые бокситы тяготеют к северной части Белгородского района КМА, а бемитовые – к его южной части. Это объясняется более расчлененным рельефом и более интенсивным дренированием профиля КВ на севере, что привело к образованию здесь пизолитовых бокситов, сложенных тригидратом алюминия. Моногидрат алюминия слагает распростра-

Таблица 2. Сопоставление зональности КВ на железистых кварцитах и сланцах

Зона	Литологические признаки, мощность		Минералы	
	КВ сланцев	КВ джеспилитов	КВ сланцев	джеспилитов
Эпигенетических процессов (карбонатизации)	Серые, зеленовато-серые массивные карбонатизированные породы. До 1 м	Пестроцветные массивные карбонатизированные породы. От первых до 5 м	Сидерит, кальцит	Минералы зон III–IV и диагенеза + карбонаты
Диагенетических процессов (сиаллитно-аллитная)	Осветленные и зеленовато-серые разубоженные, пелитоморфные и массивные бокситы. 0,1–1,5 м	Обычно плотные, пестро-окрашенные разубоженные железные руды. От первых до 8–10 м	Бертьерин, каолинит, шамозит, карбонаты, сульфиды, мушкетовит	Минералы IV зоны + сидерит, бертьерин, шамозит, сульфиды, мушкетовит
IV – конечного гидролиза Бокситовая в КВ сланцев и БЖР в КВ на джеспилитах	Бокситы пелитоморфные белые с желтоватым оттенком, красновато-бурые, местами обохренные, с реликтовой слоистостью, псевдобобовые, пятнистые, макро- и микропористые, массивные. 3–10 м	Рыхлые и массивные породы с реликтовой слоистой текстурой, реже ее утратившие, синевато-серые (синьки), в верхней части пестро-окрашенные, красновато- и желтовато-бурые (краски), иногда бесструктурные, рыхлые, реже плотные. До 100 и более м	Бемит, гиббсит, изредка диаспор, бертьерин, каолинит, железная слюдка и другие оксиды и гидроксиды железа	Мартит, гидрогематит, гетит, реликты бертьерина и маршаллитизированного кварца, реже каолинит, бемит, гиббсит
III – конечного разложения – гидролиза и окисления литомаржа	Породы светлые, бледно-зеленые, иногда бурые на поверхности, с реликтовой слоистой текстурой, мягкие, жирные на ощупь. 5–40 м	Синевато-серые (синьки), в верхней части пестро окрашенные красновато-бурые (краски), с реликтовой слоистой текстурой, иногда бесструктурные, обычно рыхлые, реже плотные. 5–40 м	Бертьерин, каолинит, маршаллитизированный кварц, мартит, железная слюдка и другие оксиды и гидроксиды железа	Мартит, гидрогематит, гетит, железная слюдка, реликты бертьерина и кварца, редко каолинит
II – промежуточного разложения (обширной гидратации и окисления)	Сохраняется реликтовая текстура сланцев, породы дезинтегрированы до щебнево-древяной отдельности. Белесые, светло-серые пятнистые. 10–45 м	Дезинтегрированные железистые кварциты, магнетит-железнослюдково-мартитовые, осветленные, с реликтовой текстурой. 10–40 м	Иллит, кварц, мартит, железная слюдка оксиды железа, бертьерин, каолинит	Мартит, железная слюдка, маршаллит, бертьерин, гидрогематит, гетит
I – начального разложения – дезинтеграции, окисления начальной гидратации	Осветленные сланцы, слегка обохренные по плоскостям сланцеватости. 10, до 50 м	Осветленные, слабо выветрелые джеспилиты с частичной мартитизацией магнетита. До 15 м, по зонам трещиноватости и контактам со сланцами – до 30 м	Минералы материнских пород, иллит, мартит гидробиотит	Минералы материнских пород, мартит, иллит, феррибиотит



ненные южнее бемитовые разности, сохранившие реликтовые сланцеватые текстуры. Вне гряд железистых кварцитов, на архейских гнейсах, занимавших пониженные формы рельефа, в поздне-турнейско-ранневизейское время формировалась каолиновая КВ. Таким образом, для образования бокситов, помимо состава материнских пород, климата и обилия органического вещества, важнейшее значение имел палеогеоморфологический фактор.

Проведенное сопоставление зональности КВ на джеспилитах и межрудных сланцах показано в табл. 2. Из нее видно, что типы руд определяются составом исходных пород, степенью их выветрелости, а также диагенетическими и эпигенетическими процессами. Образование БЖР началось уже в зоне гидратации (Михайловское), продолжалось в зоне гидролиза (Стойленское) и достигло своего максимума в раннекаменноугольное время при формировании латеритного профиля, характеризующегося обогащением верхней зоны и профиля свободными оксидами и гидроксидными Fe и Al. В этом же направлении увеличиваются мощности, разнообразие БЖР, содержание в них железа, а также появление бокситов, но только в пределах полей развития сланцево-джеспилитовой формации.

В девонское время на межрудных сланцах одновременно с образованием БЖР формировался иллит-каолиновый профиль КВ, аллитная зона с бокситами появилась на межрудных сланцах в поздне-турнейско-ранневизейское время только в Белгородском районе КМА. В раннем карбоне эта территория была расположена в экваториальной зоне [Зинчук и др., 2008], где господствовал влажный тропический климат, благоприятный для формирования аллитов. В бокситах минералы глинозема образуются непосредственно по иллиту, а также каолиниту и бертьерину. Эпигенетические процессы, наложенные на уже сформированные бокситы привели к их силицификации и карбонатизации. Образование тех или иных минералов контролировалось условиями корообразования, а также диагенетическими и эпигенетическими процессами. Одной из основных особенностей бокситов является широкое развитие в зоне гидролиза бертьерина, столь характерного для БЖР, который в основной своей массе является сингенетическим минералом КВ.

При формировании раннекаменноугольных КВ на породах сланцево-джеспилитовой формации определена ведущая роль биогенного фактора [Меркушова, Жегалло, 2016; Овчинникова, Жегалло, 2019; Боева, 2016], его возрастающая с течением геологического времени роль при выветривании. Формирование додевонских и девонских КВ происходило при ограниченной роли биогенного фактора, тогда как в начале карбона

он играл определяющую роль в образовании латеритного профиля, что выразилось в появлении зоны свободного глинозема в КВ на сланцах и резком увеличении мощности богатых железных руд.

Обнаруженные в бокситах микроорганизмы представлены фрагментами нитчатых и коккоидных бактерий, трихомов цианобактерий, гифов микрогрибов, а также продуктами их жизнедеятельности (гликокаликс и биопленки). Микроорганизмы выполняли деструктивную функцию, выраженную в разрушении минералов материнских пород, и выступали в роли накопителя рудного вещества.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный историко-генетический анализ КВ, развитой на породах сланцево-джеспилитовой формации показал различную историю их формирования в трех рудных районах КМА. Наиболее древними, маломощными и малопродуктивными являются гипергенные образования Михайловского района, перекрытые зйфельскими отложениями девона. В составе БЖР значительный объем занимают гипогенные железная слюдка и магнетит, а также труднообогатимые полуокисленные джеспилиты мощностью до 10 м. На сланцах развит иллитовый, реже каолинит-иллитовый профили выветривания. В Оскольском районе, где КВ перекрыты живецкими и франскими образованиями девона, степень выветривания, качество, мощности БЖР выше, а на сланцах развиты каолиновый и охристо-каолиновый профили. Наиболее мощные и интенсивно проработанные процессами гипергенеза – раннекаменноугольные латеритные КВ, в которых сосредоточены все бокситы и основная масса богатых железных руд КМА.

Эволюция состава КВ в палеозое на КМА заключается в последовательной смене в ней минеральных ассоциаций, сформировавшихся в результате тектонических, климатических и биосферных изменений, а также наложения диагенетических и эпигенетических процессов, определивших конечный состав выветрелых образований и связанных с ними полезных ископаемых.

Результаты исследования показали, что БЖР формировались во все этапы образования КВ в палеозое, и их можно прогнозировать на всей территории КМА, тогда как бокситы – только в Белгородском районе, под визейскими отложениями в пределах гряд развития джеспилитов. Полученные данные по вещественному составу БЖР и бокситов позволят при проведении работ по гидрокважинной добыче руд классифицировать тела полезных ископаемых по минеральному составу и

физическим свойствам – то есть по прочности, определяющей возможности гидромеханического разрушения пород и результативность воздействия химических реагентов.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания № 121041500220-0.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Боева Н.М.* Размерный эффект и органическое вещество как факторы эволюции минералообразования в зоне гипергенеза. Синхронный термический анализ / Автореф. дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2016. 22 с.
- Железные руды КМА / Под ред. В.П. Орлова, И.А. Шевырева, Н.А. Соколова. М.: ЗАО “Геоинформмарк”, 2001. 516 с.
- Зинчук Н.Н., Савко А.Д., Шевырев Л.Т.* Историческая минерагения / В 3-х томах // Т. 3. Историческая минерагения подвижных суперпоясов. Воронеж: ВГУ, 2008. 622 с.
- Меркушова М. Ю., Жегалло Е.А.* Биоморфные структуры в богатых железных рудах КМА (по результатам электронно-микроскопического исследования) // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2016. № 2. С. 150–154.
- Никулин И.И.* Бертьерин – главный силикат месторождений богатых руд КМА // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2013. № 1. С. 89–97.
- Никулин И.И.* Морфология и условия формирования железорудных кор выветривания Белгородского района КМА // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2014. № 3. С. 64–73.
- Никулин И.И., Савко А.Д.* Железорудные коры выветривания Белгородского района КМА // Труды НИИ геологии Воронежского гос. ун-та. 2015. Вып. 85. 102 с.
- Никулин И.И., Савко А.Д., Меркушова М.Ю.* Типы гипергенных богатых железных руд Белгородского района Курской Магнитной Аномалии // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2015. № 3. С. 71–82.
- Овчинникова М.Ю., Жегалло А.Е.* Ископаемые организмы и следы их жизнедеятельности в бокситах КМА // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. 2019. № 2. С. 141–145.
- Савко А.Д.* Фанерозойские коры выветривания и связанные с ними отложения Воронежской антеклизы, их неметаллические полезные ископаемые / Дисс. ... доктора геол.-мин. наук: 04.00.21. Воронеж, 1984. 551 с.
- Савко А.Д.* Геология Воронежской антеклизы // Труды НИИ геологии Воронежского гос. ун-та. 2002. Вып. 12. 163 с.
- Савко А.Д., Хожяинов 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. 49–59.
- Савко А.Д., Овчинникова М.Ю.* Основные типы и минеральный состав бокситов Курской магнитной аномалии // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Естественные науки. 2020. Т. 162. Кн. 2. С. 274–289.
- Сиротин В.И., Белявцева Е.Е.* Бокситы КМА // Труды НИИ геологии Воронежского гос. ун-та. 2016. Вып. 93. 104 с.
- Fritz S.J., Toth T.A.* An Fe-berthierine from a Cretaceous laterite: Part II. Estimation of Eh, pH and pCO<sub>2</sub> conditions of formation // Clay Clay Miner. 1997. V. 45. P. 580–586.
- Whitney D.L., Evans B.W.* Abbreviations for names of rock-forming minerals // American Mineralogist. 2010. V. 95. P. 185–187.

## Historical and Genetic Analysis of the Formation of Rich Iron Ores and Related Bauxites of the Kursk Magnetic Anomaly (Russia)

A. D. Savko<sup>1, \*</sup>, I. I. Nikulin<sup>2</sup>, M. Yu. Ovchinnikova<sup>1</sup>, N. M. Boeva<sup>3, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018 Russia

<sup>2</sup>LLC “NN TS”, Grazhdansky prosp., 11, St. Petersburg, 195220 Russia

<sup>3</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia

\*e-mail: asavko@geol.vsu.ru

\*\*e-mail: boeva@igem.ru

Rich iron ores and bauxites of the Kursk magnetic anomaly (KMA) were formed in weathering crusts on rocks of the Early Precambrian shale-jaspilite formation. Until now, weathering crusts on jaspilites and shales have been considered separately, although in each ore region they formed at the same time and represent a single sequence. Therefore, it is of great interest to compare weathering crusts of the same age on the rocks of the formation under consideration for a complex prediction of rich iron ores and bauxites. The results of the study showed that rich iron ores were formed on jaspilites during all stages of crust formation in the Paleozoic and can be predicted throughout the KMA, while bauxites were formed on interore shales only on the southwestern flank of the anomaly.

**Keywords:** Kursk magnetic anomaly, weathering crusts, rich iron ores, bauxite, magnetite, martite, hematite, boehmite, gibbsite.