

Эволюция накопления железа в истории Земли

©2023 А. Д. Савко✉

*Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1.
Воронеж, 394018, Воронеж, Российская федерация*

Аннотация

Введение: Особенности железнакопления в истории Земли рассматривались в работах Н. М. Страхова (1963), Б. М. Михайлова и др. (1984), В. Т. Фролова (1999), В. Н. Холодова (2005), А. Д. Савко (2008) и других. Вместе с тем появившиеся за последние годы новые данные по масштабной концентрации этого металла в гипергенных, осадочных и вулканогенно-осадочных месторождениях, его запасам и ресурсам, генезису и роли органики при этом позволяют расширить наши представления об эволюции железнакопления во времени, что является целью настоящей статьи.

Методика исследований и фактический материал: Основные объёмы накопленных железных руд сосредоточены в корах выветривания (КВ), осадочных, вулканогенно-осадочных и метаморфогенно-осадочных образованиях. Поэтому использовались формационный, фациальный, палеогеографический, сравнительно-литологический и стадийный методы их изучения. В основу фактического материала для настоящей статьи положены данные из трехтомника «Историческая минерагения», в которой приводятся сведения о более 5000 значимых месторождений различных полезных ископаемых, в том числе и несколько сотен по железным рудам. Данные о мировых запасах железа на 2021 год заимствованы из сводки геологической службы США (USGS)

Результаты исследований и их обсуждение: В докембрийской истории Земли было три ярко выраженных этапа формирования джеспилитов – неархейский (в течение 2.8–2.5 млрд лет), палеопротерозойский (в течение 2.5–2.3 млрд лет) и неопротерозойский (в течение 720–635 млн лет). В первый этап формирование концентраций железа происходило в морских бассейнах зеленокаменных поясов. Оно поступало из эндогенных источников, а его руды залегают в эффузивно-осадочных толщах. Общие запасы руд этого возраста составляют первые десятки миллиардов тонн. В палеопротерозойский (раннекарельский) этап образование железорудных месторождений было на территории протоплатформ суперконтинента Кенорленд за счет железа, поступавшего из КВ в источниках сноса. В анаэробных условиях на поверхности суши растворимое Fe^{+2} переносилось в морские бассейны. Там оно при воздействии кислорода, генерируемого цианобионтами, переводилось в Fe^{+3} и осаждалось на дно в виде его оксида. Так сформировались самые масштабные в Мире месторождения металла с запасами в сотни миллиардов тонн. После Великого окислительного события (2.3 млрд лет) формирование полосчатых железистых кварцитов (BIF формация) прекратилось, поскольку в атмосфере появился свободный кислород, переводивший железо в неподвижную форму в оксиде. Оно возобновилось после более миллиарда лет в условиях ледникового климата с формированием специфических руд в тиллитах. В конце эоны, в криогении, при чередовании оледенений и межледниковий, существовали глубокие аноксидные рифтовые бассейны, образованные при распаде суперконтинента Родинии. Их воды из-за разложения органики были заражены сероводородом. В них Fe^{+3} переходил в Fe^{+2} . В межледниковые эпохи связь рифтовых бассейнов с Мировым океаном восстанавливалась. Его воды приносили O_2 , который окислял железо, переводя его в осадок. В нем имеются включения эрратического материала, поступавшего из тающих плавучих льдов. К этому этапу относят огромные скопления джеспилитов Эль Мутун, Боливия с 40 млрд т руды. Общие запасы железа этой эпохи с основным минералом гематитом – первые сотни миллиардов тонн. В фанерозое, в отличие от докембрия с его накоплением железа в отдалённых частях палеоводоёмов, оно смещается в



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Савко Аркадий Дмитриевич, e-mail: savko@geol.vsu.ru

прибрежно-морские зоны и на сушу. В морях, реже в лагунах и озерах, образуются оолитовые руды лотарингского типа, сложенные гидрогетитом, шамозитом, сидеритом и гидрогематитом. На суше железо накапливается в породах КВ в виде гематита (мартита, железной слюдки), гидрогематита, гетита, гидрогетита сидерита, магнетита. Анализ распределения запасов железа в фанерозое показал, что его накопление происходило в эпохи выравнивания территорий и теплого гумидного климата, интенсивного корообразования на суше и ослабленного приноса терригенного вещества в морские бассейны. Такие условия были в раннем силуре (Северная Америка), позднем девоне-раннем карбоне (Восточная Европа), юре (Западная Европа, Австралия), кайнозое (страны с тропическим и субтропическим климатами). Особенно масштабной была последняя эпоха, когда накопилась большая часть разведанных БЖР в КВ. Значительны запасы и руд лотарингского типа. Они только в Западно-Сибирском железорудном бассейне по разным источникам составляют порядка 400–900 млрд тонн. И тот факт, что во многих случаях промышленность предпочитает докембрийские руды, объясняется возможностью получения из железистых кварцитов дешевых концентратов, содержащих более 60 % железа, практически лишённых вредных примесей.

Заключение: Железные руды в большинстве своём являются типичными экзогенными полезными ископаемыми, сформированными под влиянием различных тектонических, палеогеографических и биохимических факторов. Эволюция железнакопления имеет пульсационно-направленный тренд с ярко выраженными эпохами рудообразования. В архее аккумуляции железных руд тяготели к зеленокаменным поясам, в палеопротерозое – к протоплатформам, в неопротерозое – к рифтогенным впадинам, в фанерозое – к платформам. Руды докембрия представлены преимущественно породами формации BIF, фанерозоя – КВ и оолитовой. Со временем эволюционировали и минерально-петрографические типы руд. Если для архея и палеопротерозоя характерны гематит-магнетитовые руды BIF, неопротерозоя – гематитовые GIF, то для фанерозоя гематитовые, гидрогематитовые, гетитовые, гидрогетитовые для КВ и оолитовые гематит-шамозит-сидеритовые лотарингского типа.

Ключевые слова: джеспилиты, формация коры выветривания, оолитовые железные руды, железорудные бассейны, магнетит, гематит, мартит, гетит.

Для цитирования: Савко А. Д. Эволюция накопления железа в истории Земли // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2023. № 3. С. 4–39. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/4-39>

Введение

Важнейшие особенности формирования и распределения гипергенных, осадочных и вулканогенно-осадочных месторождений железа рассматривались во многих работах [1–11] и ряда других. В этих публикациях с использованием собственных и литературных данных были рассмотрены типы руд, распространение на континентах и в океанах этого металла, распределение и объёмы, а также их изменение в течение геологического времени. В основу фактического материала для настоящей статьи положены данные из трёхтомника «Историческая минерагения» [12], в которой приводятся сведения о более 5000 значимых месторождений различных полезных ископаемых, в том числе и железа. В этой работе рассмотрены распространение рудных скоплений, их возрастная принадлежность, генетические типы.

Вместе с тем в последние годы появились новые геологические данные по истории Земли, особенно в докембрии. Ранее при эволюционных построениях обычно не учитывались многомиллиардные запасы неопротерозойских формаций Рапитан в Северной и Урукум в Южной Америке. Требуют корректировки запасы рассматриваемого металла, поскольку разные авторы оперируют ими в размерах от 302.3 млрд [5] до 5-ти триллионов тонн [6]. При подсчете запасов железа в тропических странах богатые руды (БЖР), содержащие более 50 % Fe_2O_3 , относят к джеспилитам, хотя это иной генетический тип, относящийся к формации коры выветривания (ФКВ) и образованный в другое, чем железистые кварциты, время. Последние для кор выветривания (КВ) являются материнс-

кими породами. В них содержания оксида железа до 30–33 %. Вместе с тем появившиеся за последние годы новые данные по масштабной концентрации этого металла, его запасам и ресурсам, генезису и роли органики при этом позволяют значительно расширить наши представления об эволюции железнакопления в истории Земли, что является целью настоящей статьи.

Методика исследований и фактический материал

Установление эволюции железнакопления в геологической истории Земли предполагает решение трех задач: 1 – распределение его объёмов по стратиграфической шкале, 2 – смена во времени минерально-петрографических разновидностей руд, 3 – изменение формационных типов и обстановок железнакопления в докембрии и фанерозое. Решение первой задачи позволит выделить и охарактеризовать основные эпохи железнакопления. Рассмотрение минерально-петрографических разновидностей руд даст возможность определения основных из них для выделенных эпох. Решение третьей задачи имеет практическую направленность при составлении прогнозных карт и подсчета ресурсов железа в различных регионах.

Основные объёмы накопленных железных руд сосредоточены в КВ, осадочных, вулканогенно-осадочных и метаморфогенно-осадочных образованиях. Поэтому использовались формационный, фациальный, палеогеографический, сравнительно-литологический и стадийный методы их изучения. Применение последнего связано с формированием рассматриваемых руд на различных стадиях литогенеза – выветрива-

ния, седиментации, диагенеза, катагенеза, а также в результате преобразований при метаморфизме. Учитывался и тектонический фактор, во многом определявший рециклинг – необходимый для концентрации со временем аккумуляций железа. Принимался во внимание и эндогенный фактор, ответственный за поступление железа в бассейны осадконакопления из вулканов, гидротерм, курильщиков на дне океана в процессе эксгаляций из мантийных и коровых источников.

В основу фактического материала для настоящей статьи положены данные из трехтомника «Историческая минерагения» [12], в которой приводятся сведения о более 5000 значимых месторождений различных полезных ископаемых, в том числе и железа. В этой работе рассмотрены распространение рудных скоплений, их возрастная принадлежность, генетические типы. Это дало основание для суждения об эволюции железнакопления в истории Земли. Кроме того, по возможности использовались другие литературные источники, содержащие сведения по месторождениям железа. Среди них особое место занимает работа «Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых», в которой собраны данные по 162 объектам с интегральными ресурсами 292.5 млрд т [13]. Гипергенные месторождения КВ довольно подробно освещены в монографиях [7, 14, 15]. При работе с литературой особое внимание обращалось на количественные характеристики запасов Fe, что было необходимо для построения диаграммы его эволюции.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ распределения запасов железных руд Мира показал большие разночтения в их оценке у различных авторов и организаций. Однако большинство исследователей считает, что абсолютное большинство месторождений Fe приурочено к экзогенным и осадочно-метаморфическим образованиям. Но объёмы руд железа, опубликованных в различных источниках, как общие по Миру, так и по странам, сильно разнятся и меняются по годам. Поэтому нами мировые запасы заимствованы из последней сводки геологической службы США (USGS) на 2021 год [16]. В ней запасы разведанных месторождений составляют 175.5, а общие ресурсы – более 800 млрд тонн. При стратиграфической привязке месторождений использованы данные из работы [17].

На графике стратиграфического распределения запасов железных руд (эволюционной кривой) выделяются пики различной интенсивности, отвечающие эпохам железнакопления (рис. 1). Наиболее масштабными из них являются палеопротерозойская, неопротерозойская и кайнозойская, особенно первая. И не случайно в Международной стратиграфической шкале нижняя часть палеопротерозоя отвечает периоду сидерий (2.5–2.3 млрд лет) по широкому развитию железистых пород. В фанерозое по этому принципу названы каменноугольная и меловая системы.

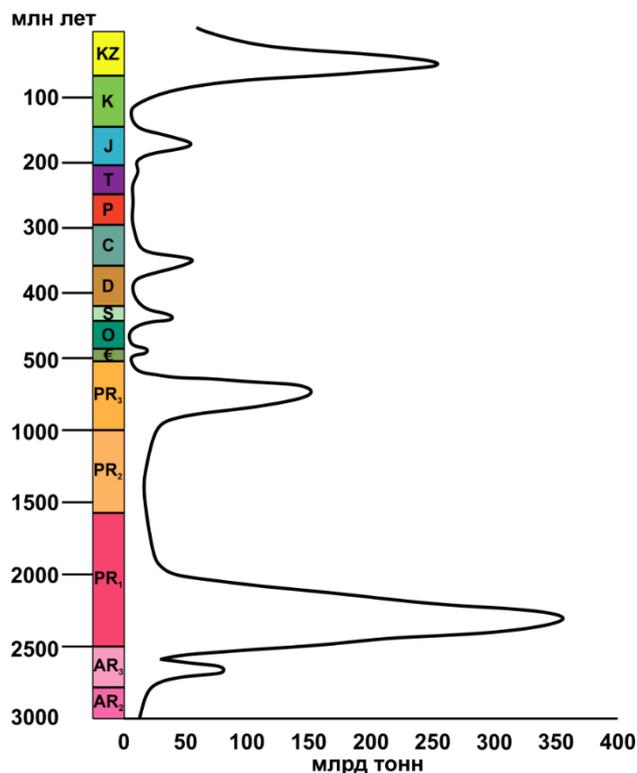


Рис. 1. Стратиграфическое распределение запасов железных руд Мира.

[Fig. 1. Stratigraphic distribution of iron ore reserves in the World.]

Оценивая масштабы железнакопления и оперируя с запасами около триллиона тонн, следует иметь в виду, что в истории Земли этого металла накопилось гораздо больше. Это связано с высоким кларком Fe (4.65), концентрации семи-восьми которых достаточно для формирования промышленных месторождений. Прогнозные запасы железа (P₂-P₃) значительно выше, приведенных на графике. Только в пределах Западно-Сибирской плиты в верхнемеловых-палеогеновых породах по разным оценкам общие прогнозные ресурсы руд с содержанием железа более 30 %, оцениваются в 393 млрд тонн [18]. А в латеритных покровах тропических стран, в кирасе, запасы руд с количеством железа более 15 % запасы составляют триллионы тонн [2].

Железные руды выделенных эпох представлены различными минералого-петрографическими образованиями. Среди последних В.Т. Фролов [4] выделяет 23 типа, В. Н. Холодов [5] – 7, которые он называет промышленными. Это 1 – джеспилиты, 2 – метасоматические сидериты, 3 – оолитовые гидрогетит-шамозит-сидеритовые, 4 – конкреционно-сидеритовые угленосных отложений, 5 – озерно-болотные, 6 – кор выветривания, 7 – россыпные титаномагнетитовые.

Анализ минералого-петрографических типов железных руд выделенных эпох показал, что основными из них являются полосчатые разности железисто-кремнистой формации или VIF, оолитовые гидрогетит-шамозит-сидеритовые (лотарингский тип), гематитовые, гетит-гидрогетитовые, ФКВ. Остальные

типы руд в определении запасов не играют сколько-нибудь заметной роли, а их количество для выделенных эпох находится на уровне статистической погрешности. Вместе с тем наличие таких руд на определенных стратиграфических интервалах может подчеркивать специфику той или иной выделенной эпохи железнакопления.

По минерально-петрографическим типам руд устанавливаются формационные и фациальные особенности их формирования, обусловленные тектоническими и палеогеографическими факторами. Они менялись со временем, что и определило эволюцию железнакопления в истории Земли. Важную роль при этом играло развитие органического мира, в докембрии заселявшего преимущественно водные бассейны, а в фанерозе завоевавшего и сушу.

Железные руды докембрия входят в состав полосчатой железисто-кремнистой формации, являясь основным источником минерального сырья черной металлургии. Они известны в зеленокаменных поясах верхов палеоархея. Но заметное развитие получают в неоархее, наибольшее – в первой половине палеопротерозоя и второе по значимости – в конце рифея. ЖКФ относится к трем основным типам: Альгома (преимущественно архей, большой вклад вулканогенных процессов), Сьюпериор (нижний протерозой, без участия вулканогенного фактора), Рапитан (верхи рифея, ледниковые условия седиментогенеза).

Неоархейский этап Его BIF известны практически

на всех континентах. В Северной Америке они развиты в пределах Канадского щита и Гренландии [3, 19], в центральной части Южной Америки – в «Железном четырехугольнике», где входят в состав комплекса Иматика [20, 21]. В Африке архейские месторождения обнаружены в Габоне, Либерии, Камеруне, Демократической республике Конго, Мавритании [9, 22]. На севере Китайской платформы джеспилиты архея приурочены к метавулканитам группы Утай [23]. Здесь разведан ряд месторождений, которые в настоящее время разрабатываются и составляют значительную часть ресурсов железа Китая.

В России архейские аккумуляции BIF разведаны на Алданском, Балтийском щитах и в пределах Курской магнитной аномалии (КМА). Продолжением КМА служит Криворожский железорудный бассейн на Украинском щите. В Алданской железорудной провинции [24] имеется ряд месторождений и проявлений (рис. 2). Железные руды тяготеют к зеленокаменным поясам, На Балтийском щите месторождения альгомаитов известны в Норвегии, Швеции и России. На северо-западе структуры разведаны 23 месторождения, сложенные яшмоидами серого и красного цвета (рис. 3). В них гематит-магнетитовые рудные слои чередуются с нерудными, где основными минералами являются кварц, биотит и амфиболы, присутствуют сидерит, анкерит, гранат. Характерной особенностью является наличие в разрезах пиритизированных углеродистых сланцев.

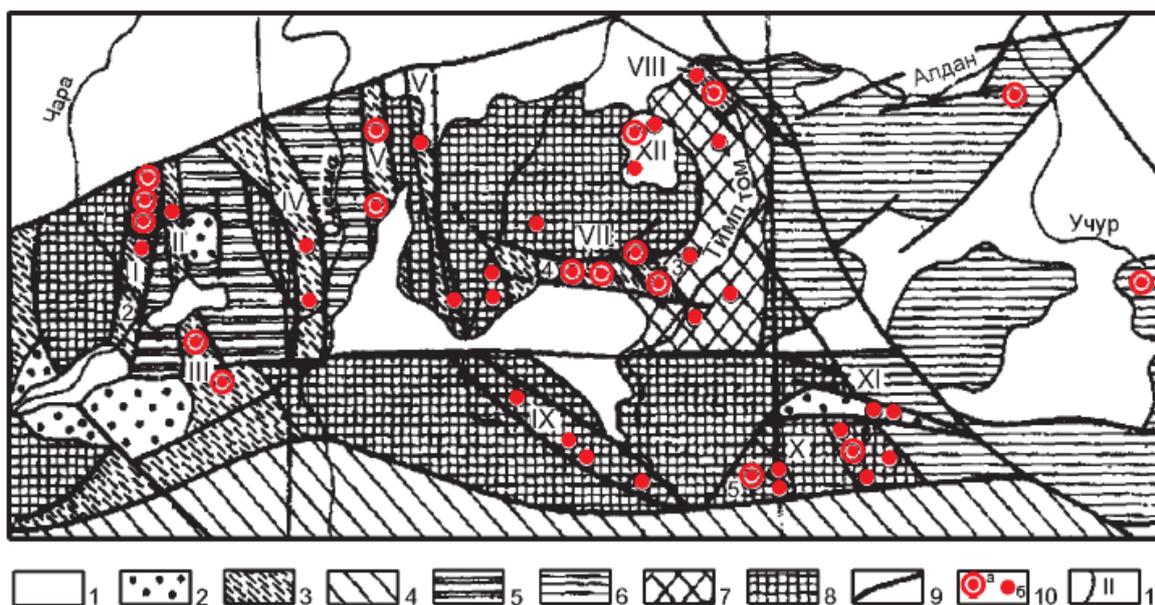


Рис. 2. Районирование Алданской железорудной провинции, Якутия. Из работы [24]: 1 – верхнепротерозойско-кайнозойские отложения платформенного чехла; 2 – нижнепротерозойские орогенные отложения в прогибах и впадинах; 3–8 – архейские метаморфические образования кристаллического фундамента Алданского щита: 3 – борсалинская, 4 – становая, 5 – олекминская, 6 – желтулинская, 7 – тимптонская, 8 – иенгская серии; 9 – разломы; 10 – железорудные месторождения (а) и проявления (б); 11 – границы железорудных зон, районов и их номера. Районирование: Чаро-Олекминская субпровинция: железорудные зоны: I – Чаро-Токкинская с Ималыкским (1) и Суломатским (2) районами, II – Токкинская, III – Ханинская, IV – Тас-Миелинская, V – Олекмо-Амгинская, VI – Верхне-Амгинская; АлданоТимптонская субпровинция: железорудные зоны: VII – Дес-Леглиерская с Леглиерским (3) и Дес-Сиванглинским (4) районами, VIII – Эмельджакский район, IX – Холодниковский район, X – Сутамо-Гонамская с Гонамским (5) и Сутамским (6) районами, XI – Нуямский район, XII – Центрально-Алданский район.

[Fig. 2. Zoning of the Aldan iron ore province, Yakutia. According to the study [24]: (1) – Upper Proterozoic-Cenozoic sediments of the sedimentary cover; (2) – Lower Proterozoic orogenic deposits in troughs and depressions; (3–8) – Archean metamorphic formations of the crystalline basement of the Aldan shield: (3) – Borsalinskaya, (4) – deadlift, (5) – Olekminskaya, (6) – Dzheltulinskaya, (7) – Timpton, (8) – Ingrian series; (9) – faults; (10) – iron ore deposits (a) and manifestations (b); eleven – boundaries of iron ore zones, regions and their numbers. Zoning: Charo-Olekma subprovince: iron ore zones: I – Charo-Tokkinskaya with Imalyk (1) and Sulomatsky (2) districts, II – Tokkinskaya, III – Khaninskaya, IV – Tas-Mielinskaya, V – Olekmo-Amginskaya, VI – Verkhne-Amginskaya; AldanoTimpton subprovince: iron ore zones: VII – Des-Leglierskaya with Legliersky (3) and Des-Sivanglinsky (4) districts, VIII – Emeldzhaksky district, IX – Kholodnikovskiy district, X – Sutamo-Gonamskaya with Gonamsky (5) and Sutamsky (6) districts, XI – Nuyamsky district, XII – Central Aldan region.]

На Балтийском щите месторождения альгомаститов известны в Норвегии, Швеции и России. На северо-западе структуры разведаны 23 месторождения, сложенные яшмоидами серого и красного цвета (рис. 3). В них гематит-магнетитовые рудные слои чередуются с нерудными, где приурочены к породам железисто-кремнисто-метабазитовой формации, метаморфизованы в амфиболитовой и гранулитовой фациях образуют пласты (до 4-х) мощностью 5–20 м. В составе руд резко преобладает легкообогащаемый магнетит, присутствуют кварц, пироксены и амфиболы. Запасы +

прогнозные ресурсы – 15 млрд т руды или 6.1 % от общих России [25].

В Карелии, в Оленегорском рудном районе, имеется ряд месторождений неоархейских джеспилитов. Наиболее изученным из них является Костамукшское. В них породы ВIF (рис. 4) залегают среди гнейсов гимольской серии. Рудная толща (костамукшская свита) сложена кварц-биотитовыми и углистыми сланцами, биотит-магнетитовыми, грюнерит-магнетитовыми, магнетит-роговообманково-грюнеритовыми и другими кварцитами и их разновидностями.



Рис. 3. Породы ЖКФ типа Альгома. Слева железистые кварциты Бьёрневатн (Bjornevatn), Северная Норвегия. Темные слои магнетит, светлые – кварц с примесью пироксено и амфиболов. Из работы [26]. Справа – архейские кварц-грюнерит-магнетитовые альгомаиты золотого месторождения Фёболиден, Северная Швеция, с первичной мезо- и тонкой слоистостью. Из работы [27].

[Fig. 3. Rocks of ferruginous-silicious formations of Algoma-type. On the left are ferruginous quartzites. Bjornevatn (Bjornevatn), Northern Norway. The dark layers are magnetite, the light layers are quartz with admixtures of pyroxenes and amphibole. FAccording to the study [26]. On the right – Archean quartz-grunerite-magnetite algaomites of the gold Phobolidendeposit, Northern Sweden, with primary meso- and fine stratification. According to the study [27].]



Рис. 4. Железистый кварцит Костомукшского месторождения. Из работы [28]. Полоски серого цвета сложены магнетитом, красновато-бурые – кварцем и силикатами, затронутыми выветриванием.

[Fig. 4. Ferrous quartzite from the Kostomuksha deposit. According to the study [28]. The grey stripes are composed of magnetite, the reddish-brown stripes are composed of quartz and silicates affected by weathering.]

В минеральном составе рудной части разреза развит преимущественно магнетит, гематита – первые проценты. Нерудные представлены кварцем, амфиболами и биотитом. Акцессорные минералы – пирит, пирротин и апатит. Отличительными чертами месторождения является сложное, невыдержанное по мощности строение, частое переслаивание с безрудными прослоями, обилие наложенной кварц-сульфидной минерализации [26]. Содержание железа в рудах 32.16–33.64 %, серы и фосфора – сотые доли процента, запасы – около 2-х млрд тонн.

На территории КМА в работах по раннему докемб-

рию [10, 29] рассматривается три уровня развития ЖКФ – мезо- и неоархейские и раннепротерозойский. Первые представлены зеленовато-серыми пироксен-магнетитовыми кварцитами, залегающими среди плагиогнейсов обоянского комплекса, вторые образуют пласты хлорит-амфибол-магнетитовых кварцитов в толще амфиболовых сланцев и гнейсов михайловской серии. Третий уровень с наиболее продуктивными классическими ЖКФ курской серии рассмотрен ниже.

Мезоархейские ЖКФ хорошо изучены в пределах Курско-Бесединской структуры. Представлены чередующимися слоями мощностью от 1–2 до 30–35 м пород ЖКФ (двупироксен-магнетитовые кварциты иногда с гранатом), метапелитов (шпинель-гранат-кордиерит-силлиманитовые гнейсы), двупироксен-плагиоклазовых иногда с гранатом метагабброидов и метапироксенитов. Железистые кварциты имеют массивные, полосчатые и неясно полосчатыми текстуры, средне- и крупнозернистыми текстуры, возникшие в условиях гранулитовой фации метаморфизма. В минеральном составе преобладают кварц, пироксены, магнетит. Содержание рудного минерала 45–65 %. По данным работы [10] породы характеризуются низкими содержаниями REE и высокими значениями отношения Ni/Fe, свидетельствующими о гидротермальных источниках рудного вещества. Подобные мезоархейские ЖКФ имеются в Приазовском блоке Украинского кристаллического щита.

Неоархейские BIF KMA приурочены к зеленокаменным поясам, на месте которых потом были заложены палеопротерозойские отрицательные структуры, где затем происходило масштабное накопление железисто-кремнистых осадков. Неоархейские джеспилиты слагают линзы и пласты (1–45 м) вулканогенно-осадочных пород михайловской серии, которые подстилаются образованиями обоянской, а перекрываются джеспилитами и сланцами курской серий палеопротерозоя. Пласты и линзы сложены слоями амфибол-магнетитового, кварцевого и амфибол-кварцевого составов. В отличие от мезоархейских, неоархейские джеспилиты содержат пониженные количества (мас. %) Fe_2O_3 (29–38), повышенные SiO_2 (49–64), Al_2O_3 (2.8–6.0) и REE (среднее 55 ppm) [10]. Основными минералами пород являются кварц, магнетит, роговая обманка, грюнерит, хлорит, второстепенными – гранат, эпидот, биотит. Всё это указывает на принадлежность джеспилитов неоархея KMA к железисто-кремнисто-метабазитовой формации.

Палеопротерозойский этап. Его ЖКФ наиболее распространены на всех континентах Мира и к ним приурочены основные запасы железа в докембрии (см. рис. 1). На Северо-Американской платформе, в пределах пояса Лабрадор на пограничных территориях США и Канады, имеются крупнейшие залежи месторождений железистых кварцитов типа Сьюпериа в надсерии Гурон. Протяженность пояса – 1300 км, ширина 10–100 км. Мощность рудных пластов 15–300 м, средние содержания железа в них 25–35 %, запасы – около 100 млрд тонн [3]. Местное название руд – такониты. В них гематит-магнетитовые слои чередуются с мусковит-олигоклаз-кварцевыми (рис. 5). При вы-

ветривании в мезозое на джеспилитах сформировались богатые железные руды с запасами 7 млрд тонн [9].

В Южной Америке образования палеопротерозойской группы Итабира вмещают железорудные месторождения мирового уровня. Основные залежи находятся в пределах "Железного Четырехугольника", где известны свыше 100 месторождений железа, связанных с итабиритами серии Минас палеопротерозоя. Только в Бразилии сосредоточено 18 % от общемировых запасов железных руд. Богатые руды, представляющие KB кайнозойского возраста по джеспилитам, содержат 3–69% металла. Итабириты – оксидные железистые кварциты, в которых кремнистые или яшмовые прослойки перекристаллизованы в агрегат кварца (см. рис. 5). Магнетит, гематит образуют слои при низком содержании мусковита. Они отличаются от таконитов почти полным отсутствием силикатов, от кварцитов – содержанием более 10 % минералов железа, от «железняков» – присутствием более 10 % SiO_2 . Месторождения джеспилитов есть в Уругвае и Аргентине, где разрабатываются открытым способом. В верхах разрезов на джеспилитах развит элювий с БЖР.

На Африканском континенте породы BIF распространены в его южной (ЮАР) и западной (Ангола, Чад и другие страны) частях. На юге они приурочены к отложениям супергруппы Трансвааль (мощность 6 км). В их состав входят кварциты, джеспилиты с промышленными залежами железных руд, псефиты, сланцы со знаками ряби и трещинами усыхания, доломиты, строматолитовые известняки с прослоями и линзами кремней, сланцы с горизонтами тиллитов, андезитовые лавы, силы диабазов. Вулканогенные породы тяготеют к низам разрезов, железистые кварциты к их верхним частям. Такие породы формируются в мелководно-морских условиях, причем джеспилиты в наиболее удаленных от берега фациях. Характерной особенностью железорудных месторождений ЮАР является их ассоциация с марганцевыми месторождениями. Большая часть последних находится близ крупнейшего марганцеворудного поля Калахари.

В Западной Африке основные месторождения железистых кварцитов распространены на Леоно-Либерийском щите. Эти объекты во многих источниках характеризуют как итабириты, схожие с теми, что распространены на востоке Бразилии. Делают вывод: в нынешних Западной Африке и на Амазонском кратоне они формировались в едином бассейне до открытия впадины Атлантического океана [9 и ссылки в ней]. Залежи железных руд активно разрабатывают в Сьерра Леоне, Либерии. Известны они в Гвинее (Нимба, у границы со Сьерра Леоне), Сенегале (Фалеме), Мавритании, Чаде, Анголе, Камеруне, Нигерии, Республике Конго.

Наибольшими запасами железных руд среди стран Африки располагает ЮАР, по различным источникам, в несколько миллиардов тонн, что составляет незначительную часть от общих запасов этого вида минерального сырья в Мире. Вместе с тем ЮАР входит в первую десятку стран по добыче железных руд, являясь их экспортером.

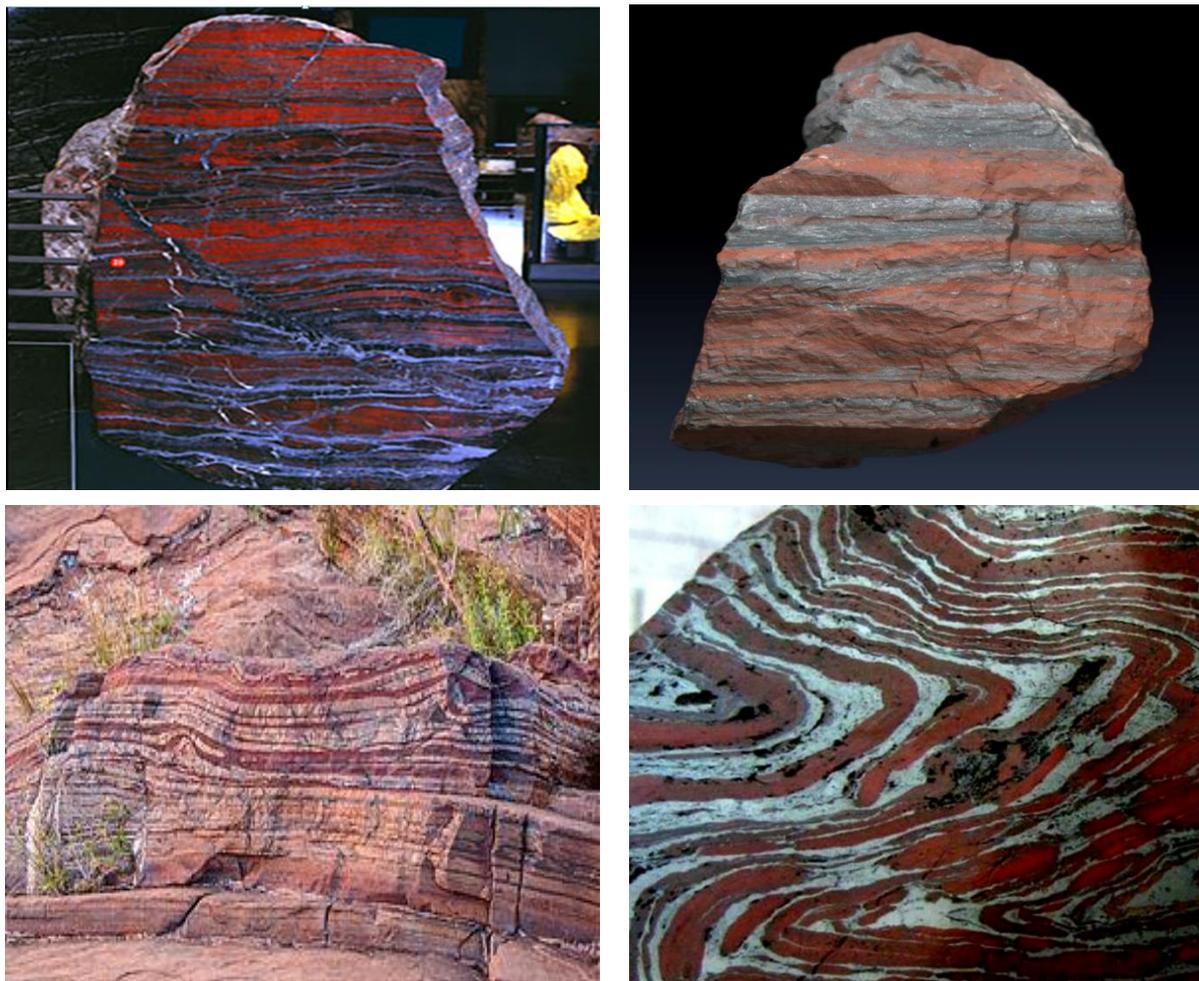


Рис. 5. Породы ВІФ палеопротерозоя. Вверху слева – таконит, пров. Онтарио, Канада; вверху справа – итабирит, «Железный четырехугольник», Бразилия; внизу слева – обнажение джеспилитов бассейна Хамерсли; внизу справа – джеспилиты курской серии КМА. Из работы [9 и ссылок в ней].

[Fig. 5. BIF rocks of the Paleoproterozoic. Top left - taconite, Ontario province, Canada; top right - itabirite, “Iron Quadrangle”, Brazil; bottom left - outcrop of Hamersley Basin jaspilites; bottom right - jaspilites of the Kursk KMA series. According to the study [9 and references therein].]

Самыми крупными запасами джеспилитов и развитыми на них БЖР в КВ обладает Австралия – 28.7 % от общемировых. Эта страна – один из ведущих мировых производителей и экспортёров железной руды, запасы которой, по оценкам агентства Geoscience Australia, на 1 января 2021 года составляли 51.7 млрд тонн, а «предполагаемые» ресурсы – 80.2 млн тонн железной руды. Железородная промышленность Австралии занимает доминирующее положение на рынках стран Азии. В 2022 году в стране произведено более 900 млн т продукции этого вида минерального сырья с содержанием железа 560 млн т. В занимающей 2-е место Бразилии добыто 380 млн т с 240 млн т. Fe, в Китае соответственно – 360 и 220, Индии 241 и 150, России 100 и 71 [30]. При этом в Китае и России помимо железа в месторождениях пород ВІФ учитывались запасы других генетических типов, тогда как в остальных трех странах – только первые и КВ на них.

В Австралии основной объём железных руд сосредоточены на её северо-западе. Самые богатые железоро-

удные районы страны – Хамерсли, Норт Пилбара и Кимберли находятся в штате Западная Австралия. Именно там добывается и производится 99 % австралийского железорудного сырья. Остальной объём железных руд (1 %) добывают в штатах Южная Австралия и Тасмания.

Железородный бассейн Хамерсли в штате Западная Австралия площадью 150 тыс. км² включает свыше 100 месторождений. Общие запасы богатых руд 32 млрд т с содержанием железа 64–67 %, бедных руд – железистых кварцитов – сотни миллиардов тонн с количеством железа 25–40 %. Здесь находятся уникальные месторождения Маунт-Том-Прайс, Палабурду и др. с, которые разрабатываются карьерами (рис. 6).

В разрезах группы Хамерсли джеспилиты чередуются со сланцами. Выделяется четыре уровня развития ЖКФ общей мощностью чуть более 1000 м. Самый нижний неогархейский- Марра Мамба (2.63–2.60 млрд лет), выше – раннепротерозойские Брокман (2.6–2.45 млрд лет), Уилли Уолли, а также Булгида

[32]. Две нижние формации сложены типичными хемогенными BIF, две верхние – железистыми микритами, включающими заметную примесь терригенного материала. Наиболее продуктивна формация Брокмен, с которой связано абсолютное большинство

месторождений. В ней джеспилиты чередуются со сланцами. Выделяются: 1 – нижние джеспилиты – Дэйлс Гордж, 2 – нижние сланцы Брокман, 3 – верхние джеспилиты Джоффер Уэйлбэк, 4 – верхние сланцы – Яндикугина.



Рис. 6. Карьер месторождения Хамерсли. Серо-синим цветом окрашены гематитовые руды, буро-красным – гидрогематит-гетитовые [31].

[Fig. 6. Hamersley quarry. Hematite ores are grey-blue, and hydrohematite-goethite ores are brown-red [31].]

Характерными особенностями джеспилитов являются горизонтально залегающие слои мощностью в миллиметры. Они прослеживаются по разрезам и площади на километры. Их формирование происходило биохемогенным способом на пассивной окраине континента в пределах удаленной части шельфа выровненной карбонатной платформы. Породы после литогенеза были подвергнуты низкотемпературному метаморфизму до зеленосланцевой фации.

В Индии основные запасы железных руд (4,07 % от общемировых) связаны с кайнозойскими КВ на породах BIF раннего протерозоя. Они сосредоточены преимущественно на северо-востоке её территории, где известен железорудный и марганцевый бассейн Сингбхум в районе «Железного пояса». Полосы железистых кварцитов возвышаются в рельефе и тянутся на сотни километров, мощности рудной толщи до 1 км. Здесь имеется серия крупных месторождений, в том числе и железо-марганцевых. Мощности рудной толщи достигают 1 км. Железные руды материнских пород по составу гематит-магнетитовые, карбонатно-магнетитовые, в КВ по ним – гематитовые, гидрогематит-гетитовые. Содержание железа в них 60–66 %.

Особенностью железных руд Индии является повышенное количество глинозема (до 5 %). Оно обусловлена терригенной примесью рудах BIF, что сказывается на понижении их качества, которое впрочем

довольно высокое. Эта страна занимает 4-е место по объёму добычи рассматриваемого сырья (240 млн т), значительная часть которого идет на экспорт.

На Китайской платформе главная железорудная эпоха относится к палеопротерозою. В основании его разреза залегают конгломераты, гравелиты, кварциты, кремнистые мраморы, филлиты. Пластовые залежи гематитовых, магнетит-гематитовых, магнетитовых джеспилитов тяготеют к горизонтам слюдястых сланцев. Мощность отдельных рудных пластов достигает до 150 м. Они обнаруживаются на обширных территориях, что обуславливает большое экономическое значение железорудных месторождений. Большая часть китайских железных руд имеет небольшое содержание Fe (до 35 %) и низкое качество из-за высокого количества в них вредных примесей.

Примером раннепротерозойских BIF является месторождение Шуангыашань (Shuangyashan) на севере Китая близ границы с РФ. В его разрезе пласты железистых кварцитов залегают согласно с вмещающими силлиманитовыми сланцами, гнейсами, мраморами протерозойской группы Синьдонг (Xingdong). Основная залежь со средним содержанием Fe 30 % имеет длину свыше 2 км и мощность около 10 м. По падению она прослежена на 520 м. Руды полосчатые, массивные, состоят из магнетита, гематита, кварца, в качестве примесей присутствуют авгит, диопсид и пирит. Своей

руды Китаю не хватает и он ежегодно импортирует её порядка 1 млрд тонн.

На *Восточно-Европейской платформе* в пределах Украинского щита (УЩ) и Курского блока Воронежского кристаллического массива (ВКМ) расположен крупнейший в Мире раннепротерозойский Курско-Криворожский железорудный мегабассейн. УЩ и

ВКМ в раннем протерозое входили в состав единого Сарматского щита. Он в рифее был разделен на две части Днепровско-Донецким авлакогеном. Протоплатформенные отложения нижнего протерозоя были развиты в пределах Курско-Криворожского синклинория, и сложены различными породами, среди которых широко распространены отложения ВIF (рис. 7).

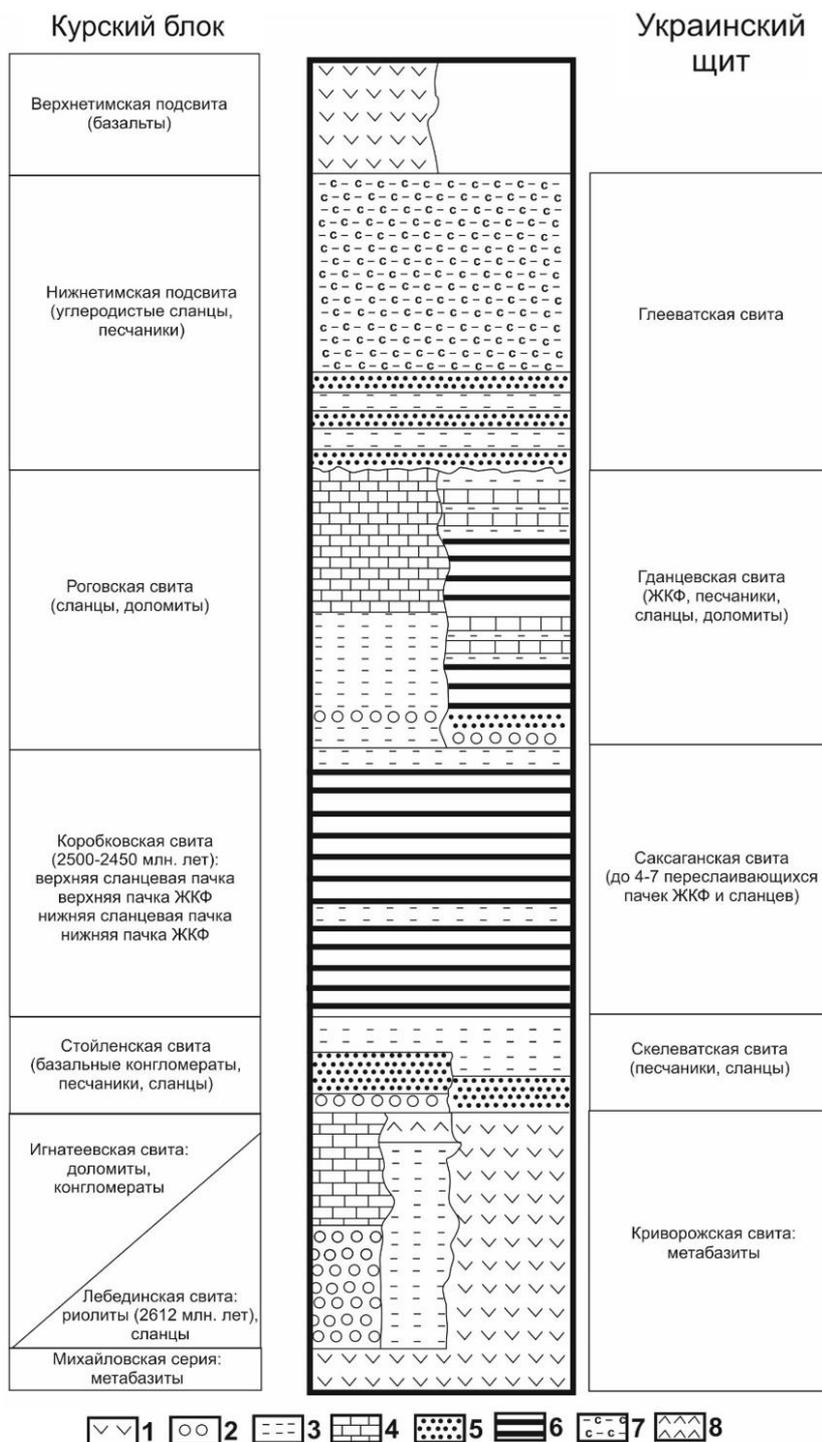


Рис. 7. Сопоставительные разрезы нижнего протерозоя ВКМ и УЩ. 1 – базальты; 2 – конгломераты; 3 – сланцы; 4 – карбонатные породы; 5 – песчаники; 6 – железисто-кремнистые формации; 7 – углеродистые сланцы; 8 – риолиты [33].

[Fig. 7. Comparative sections of the Lower Proterozoic of VCM and US. (1) – basalts; (2) – conglomerates; (3) – slates; (4) – carbonate rocks; (5) – sandstones; (6) – ferruginous-siliceous formations; (7) – carbonaceous shales; (8) – rhyolites [33].]

Курская магнитная аномалия (рис. 8) занимает большую часть Белгородской, Курской, Орловской областей. Протяженность бассейна – 600 км, ширина – 150–250 км, общая площадь – 120 млн км. По данным работы [34] балансовые запасы железных руд всех категорий Курской магнитной аномалии (КМА составляют 65, прогнозные – 123 млрд тонн. Но в монографии [35] рассмотрены свыше 100 месторождений железных руд с общим потенциалом 1514 млрд т железистых кварцитов и 72 млрд т богатых железных руд. Разведанные запасы железных руд бассейна КМА составляют шестую часть мировых и 66 % российских.

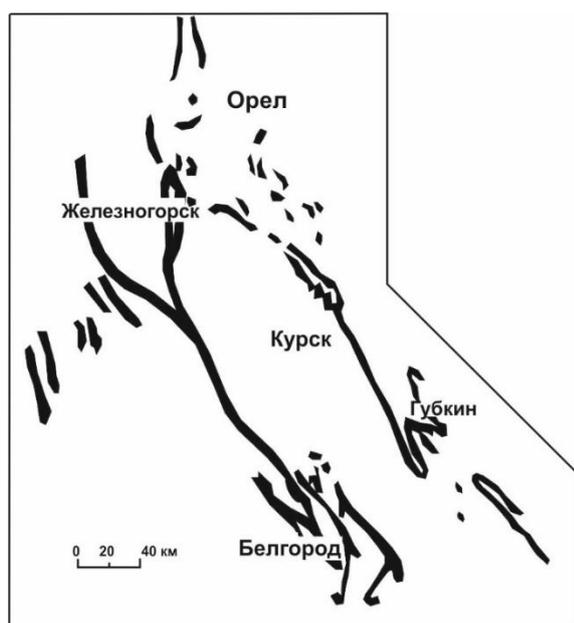


Рис. 8. Расположение полос железистых кварцитов КМА.
[Fig. 8. Location of bands of ferruginous quartzites of KMA.]

На ВКМ, в районе КМА, развиты отложения курской серии, включающие карбонатные, терригенные и хемогенные породы ЖКФ. Они формировались на архейской платформе и имели площадное распространение, но сохранились от размыва только в узких линейных зонах юго-восточно-северо-западного простирания (рис. 9).

Эти структуры представляют собой внутриконтинентальные рифты, заложившиеся в середине палеопротерозоя около 2.2 млрд лет назад на архейской платформе. Наиболее крупные из них: УЩ – Кременчугско-Криворожская структура шириной до 10 км и протяженностью до 300 км, в пределах Курского блока ВКМ – западная Белгородско-Михайловская структура, состоящая из Белгородской и Михайловской синформ и восточная Щигровско-Оскольская, включающая Тим-Ястребовскую и Вологовскую синформы. Эти структуры протягиваются более чем на 550 км при ширине 8–40 км (см. рис. 8). Бассейн КМА включает семь железорудных районов (рис. 9). Только в трех из них ведется добыча железных руд. Это Оскольский, Михайловский и Белгородский. В первых двух открытыми способом разрабатываются относительно легко

обогащающиеся железистые кварциты, в на Яковлевском месторождении шахтным способом третьем в относительно небольших масштабах добываются БЖР, представляющие КВ на джеспилитах.

Отложения палеопротерозоя Курского блока включают хемогенно-терригенные отложения курской серии и вулканогенно-терригенные породы оскольской серии. Железистые кварциты и межрудные сланцы стратиграфически относятся к коробковской свите курской серии (рис. 10), а структурно приурочены к крыльям и замковым частям синклиналей.

Залежи железистых кварцитов представлены пластами мощностью до 200–500 м моноклиального или сложноскладчатого залегания. Падение их крутое до субвертикального. Протяженность залежей – до нескольких десятков километров. Джеспилиты представлены плотными полосчатыми очень крепкими породами (см. рис 5). Полосчатость обусловлена чередованием разноокрашенных слоев шириной от долей миллиметра до 1.5–2 см, сложенных преимущественно рудными и нерудными минералами. Основные рудные минералы кварцитов – магнетит, реже гематит, а нерудные – кварц и другие силикаты. Среди последних преобладают биотит и амфиболы (куммингтонит, актинолит, реже тремолит), встречается пироксен. В виде примесей железистые кварциты содержат карбонаты и сульфиды (пирит, пирротин). Сланцы преимущественно биотит-кварцевые с примесью щелочных амфиболов.

Среднее содержание железа в балансовых рудах колеблется по отдельным месторождениям от 32.0 до 36.8 %. Железистые кварциты после измельчения хорошо обогащаются технологически простым и экологически чистым методом мокрой магнитной сепарации с получением высококачественного магнетитового концентрата.

Криворожский железорудный бассейн занимает площадь около 300 млн км² территории Украинского кристаллического щита (рис. 11) и объединяется в крупную железорудную провинцию, так называемый Большой Кривой Рог. В структурном отношении он расположен в пределах узкого (10 км шириной) меридионального Кременчугско-Криворожского приразломного синклинория, ограничивающего с запада Приднепровский блок, реликтовое сооружение с древнейшими гранито-гнейсовыми комплексами платформы. По выходам пород синклинорий прослежен на 50 км, по данным бурения – на 220 км. Магнитометрические материалы позволили проследить эту структуру на 1000 км между Херсонской аномалией и Юго-Западной (Белгород-Михайловской) синклинорной зоной КМА. Параллельно Кременчугско-Криворожскому синклинорию тянется Западно-Ингулецкая краевая зона. Их общая ширина достигает 70 км. Основные рудные залежи обнаружены в полосе шириной 2–7 км, вытянутой в меридиональном направлении примерно на 100 км вдоль рек Желтой, Саксагань, Ингулец, относящихся к бассейну Днепра. Северным продолжением Криворожского бассейна является Кременчугская магнитная аномалия.

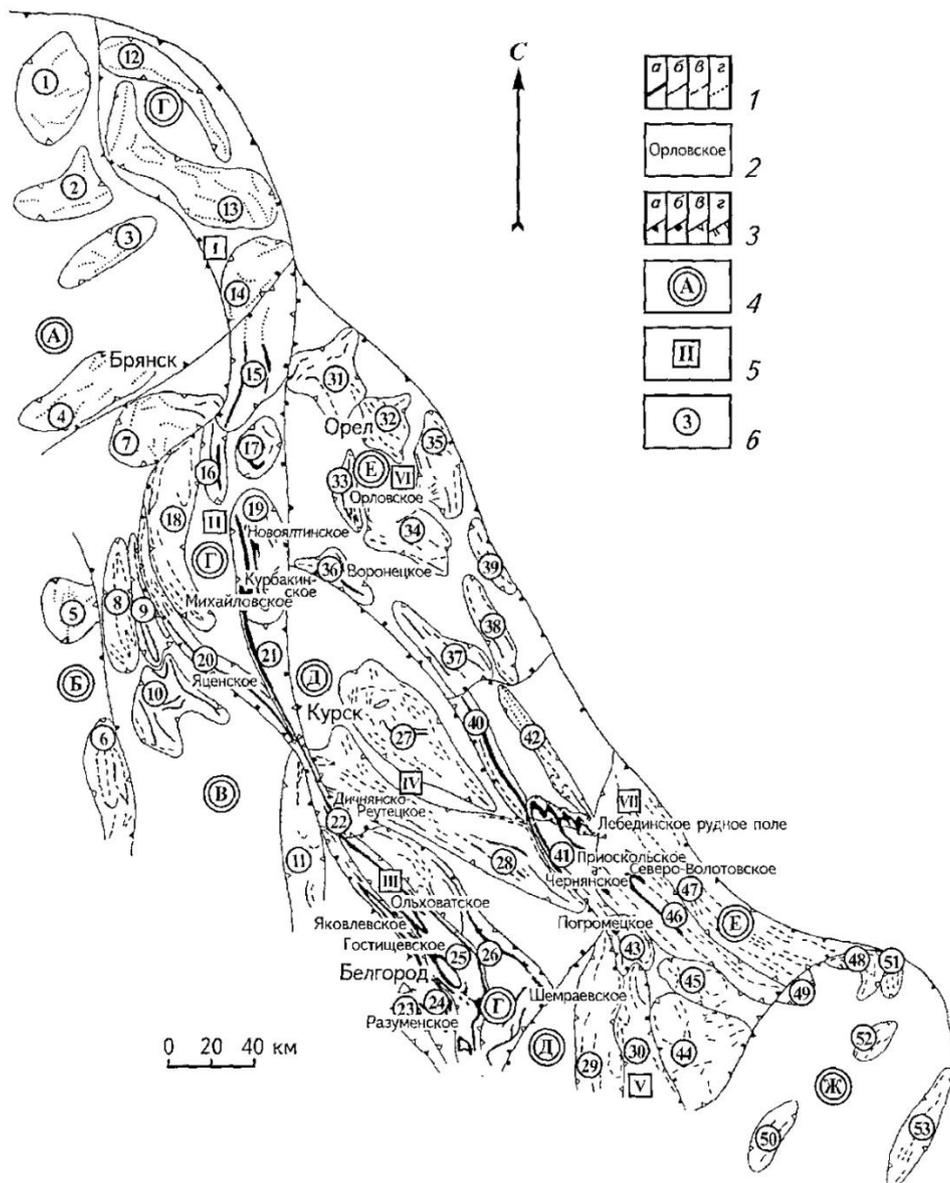


Рис. 9. Схема металлогенического районирования Курской железорудной провинции [17]. 1 – железорудные образования нижнепротерозойского возраста мощностью более 200 м (а), 30–200 м (б), менее 30 м (в), выделенные по данным аэромагнитной съемки (г); 2 – месторождения железных руд; 3 – границы металлогенических зон и областей (а), рудных (металлогенических) районов (б), рудных, рудоносных, аномальных зон и узлов (в), Лебединского рудного поля (г); 4 – металлогенические зоны и области: А – Брянская область, Б – Крупецкая, В – Льговская, Г – Михайловско-Белгородская, Д – Курско-Корожанская, Е – Орловско-Оскольская зоны, Ж – Россошанская область; 5 – рудные (металлогенические) районы: I – Бяратинский, II – Михайловский, III – Белгородский, IV – Курский, V – Валуйский, VI – Орловский, VII – Оскольский; 6 – рудные, рудоносные, аномальные зоны и узлы: 1 – Малеевский, 2 – Дубровкинский, 3 – Дьяковская, 4 – Ровенский, 5 – Будский, 6 – Крупецкий, 7 – Ждановский, 8 – Севская, 9 – Почепнянская, 10 – Рылский, 11 – Тарасовская, 12 – Анисовская, 13 – Людиновская, 14 – Сталкинский, 15 – Хотынецкий, 16 – Шаблыкинская, 17 – Нарышкинская, 18 – Комаричская, 19 – Железнодорожский, 20 – Фатеевская, 21 – Жигаевская, 22 – Реутецкий, 23 – Олимпийский, 24 – Яковлевско-Таволжанская, 25 – Ольховатско-Купиновская, 26 – Прохоровско-Большетроицкая, 27 – Бесединская, 28 – Медвенско-Истобнянская, 29 – Богдановская, 30 – Уразовская, 31 – Знаменский, 32 – Моховский, 33 – Орловская, 34 – Малоархангельский, 35 – Кологреевский, 36 – Воронежская, 37 – Петровско-Вязовская, 38 – Исаковская, 39 – Сосновская, 40 – Щигровско-Огибнянская, 41 – Старооскольский, 42 – Ястребовская, 43 – Погромацкая, 44 – Самаринский, 45 – Тихососненская, 46 – Волотовская, 47 – Шаталовско-Алексеевская, 48 – Коденцовская, 49 – Никитовский, 50 – Новомосковский, 51 – Сагуновский, 52 – Сотницкий, 53 – Высочановская.

[Fig. 9. Scheme of metallogenetic zoning of Kursk iron ore province [17]. (1) – iron ore formations of Lower Proterozoic age with a thickness of more than 200 m (a), 30–200 m (b), less than 30 m (c), isolated according to aeromagnetic survey data (d); (2) – iron ore deposits; (3) – boundaries of metallogenetic zones and regions (a), ore (metallogenetic) areas (b), ore, ore-bearing, anomalous zones and nodes (c), Lebedinsky ore field (d); (4) – metallogenetic zones and regions: (A) – Bryansk region, (B) – Krupetskaya, (B) – Lgovskaya, (G) – Mikhailovsk-Belgorod, (D) – Kursk-Korochanskaya, (E) – Oryol-Oskol zones, (W) – Rossoshanskaya region; (5) – ore (metallogenetic) districts: (I) – Baryatinsk, (II) – Mikhailovsk, (III) – Belgorod, (IV) – Kursk, (V) – Valuysk, (VI) – Orlovsk, (VII) –

Oskolsk; (6) – ore, ore-bearing, anomalous zones and nodes: (1) – Maleevsky, (2) – Dubrovinsky, (3) – Dyakovskaya, (4) – Rivne, (5) – Budsky, (6) – Krupetsky, (7) – Zhdanovsky, (8) – Sevskaya, (9) – Pochepnyanskaya, (10) – Rylsky, (11) – Tarasovskaya, (12) – Anisovskaya, (13) – Ludinovskaya, (14) – Stalkinsky, (15) – Khotynetsky, (16) – Shablykinskaya, (17) – Naryshkinsky, (18) – Komarichskaya, (19) – Zheleznogorsk, (20) – Fateevskaya, (21) – Zhigaevskaia, (22) – Reutetsky, (23) – Olympic, (24) – Yakovlevsko-Tavolzhanskaya, (25) – Olkhovatsko-Kupinovskaya, (26) – Prokhorovsko-Bolshetroitskaya, (27) – Besedinskaya, (28) – Medvensko-Istobnyanskaya, (29) – Bogdanovskaya, (30) – Urazovskaya, (31) – Znamensky, (32) – Mokhovskiy, (33) – Orlovskaya, (34) – Maloarkhangelsky, (35) – Kologreevsky, (36) – Voronetskaya, (37) – Petrovsko-Vyazovskaya, (38) – Isakovskaya, (39) – Sosnovskaya, (40) – Shchigrovsko-Ogibnyanskaya, (41) – Starooskolsky, (42) – Yastrebovskaya, (43) – Pogrometskaya, (44) – Samarinsky, (45) – Tikhososnenskaya, (46) – Volotovskaya, (47) – Shatalovsko-Alekseevskaya, (48) – Kodentsovskaya, (49) – Nikitovskiy, (50) – Novomoskovskiy, (51) – Sagunovskiy, (52) – Somitsky, (53) – Vysochanovskaya.]

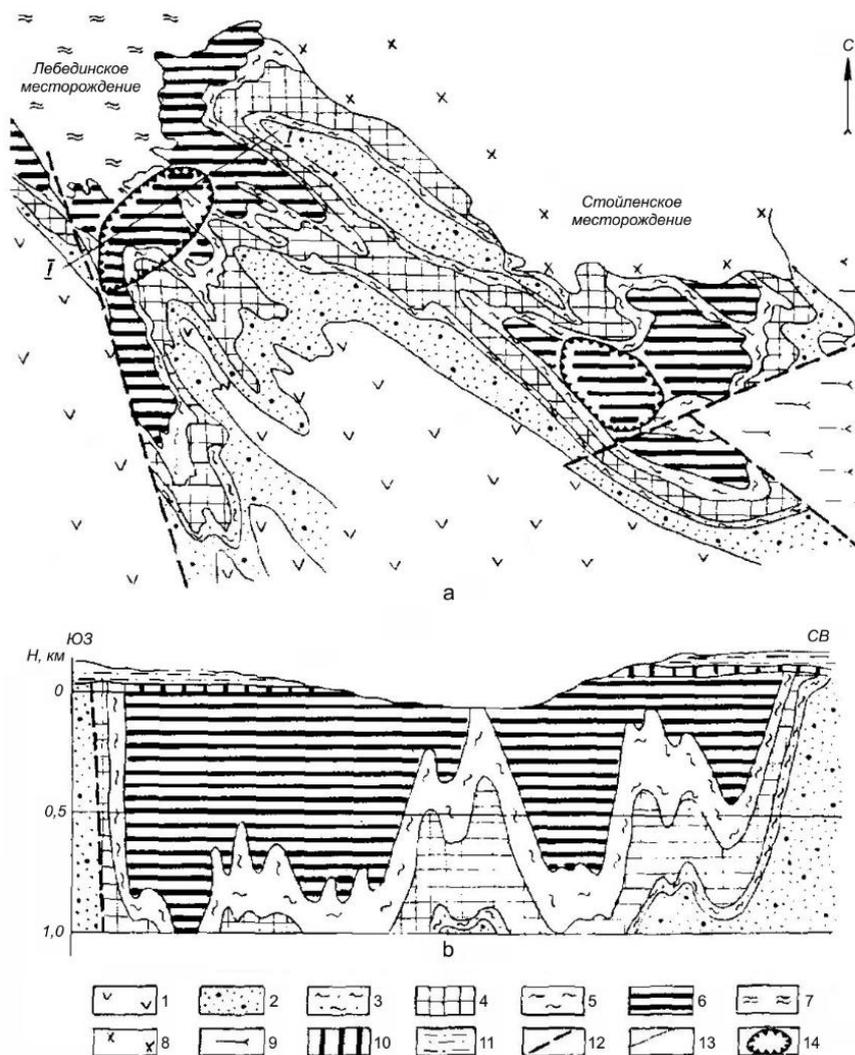


Рис. 10. Схематическая геологическая карта Лебединского и Стойленского месторождений (а) и разрез по линии I-I (б) [35, с. 84]. Верхний архей: 1 – михайловская серия (AR₂mh); нижний протерозой: курская серия (PR₁ks), стойленская свита (PR₁st): 2 – нижнестойленская конгломерато-кварцитовая подсвита (PR₁st₁); 3 – ерхнестойленская сланцевая подсвита (PR₁st₂); коробковская свита (PR₁kr): 4 – нижняя железорудная подсвита (PR₁kr₁); 5 – нижняя сланцевая подсвита (PR₁kr₂); 6 – верхняя железорудная подсвита (PR₁kr₃); 7 – верхняя сланцевая подсвита (PR₁kr₄); 8 – стойленско-николаевский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс (γδPR₁sn); атаманский гранитоидный комплекс (γPR₁a); 9 – полимигматиты и митматиты в основном по породам михайловской серии; 10 – богатые железные руды KB; 11 – отложения осадочного чехла; 12 – разломы; 13 – геологические границы; 14 – железорудные карьеры.

[Fig. 10. Schematic geological map of the Lebedinskoye and Stoilenskoye deposits (a) and section along the line I-I (b) [35, p. 84]. Upper Archaean: (1) – Mikhailovskaya series (AR₂mh); Lower Proterozoic: Kursk series (PR₁ks), Stoilensky Formation (PR₁st): (2) – Lower Stoilensky conglomerate-quartzite subformation (PR₁st₁); (3) – Upper Stoilensky shale subformation (PR₁st₂); Korokkovskaya Formation (PR₁kr): (4) – lower iron ore subformation (PR₁kr₁); (5) – lower shale subformation (PR₁kr₂); (6) – upper iron ore subformation (PR₁kr₃); (7) – upper shale subformation (PR₁kr₄); (8) – Stoilensky-Nikolaevsky gabbro-diorite-granodiorite complex (γδPR₁sn); Atamansky granitoid complex (γPR₁a); (9) – polymigmatites and mitmatites, mainly from rocks of the Mikhailovsky series; (10) – high-grade iron ores WCs; (11) – deposits of the sedimentary cover; (12) – faults; (13) – geological boundaries; (14) – iron ore quarries.]

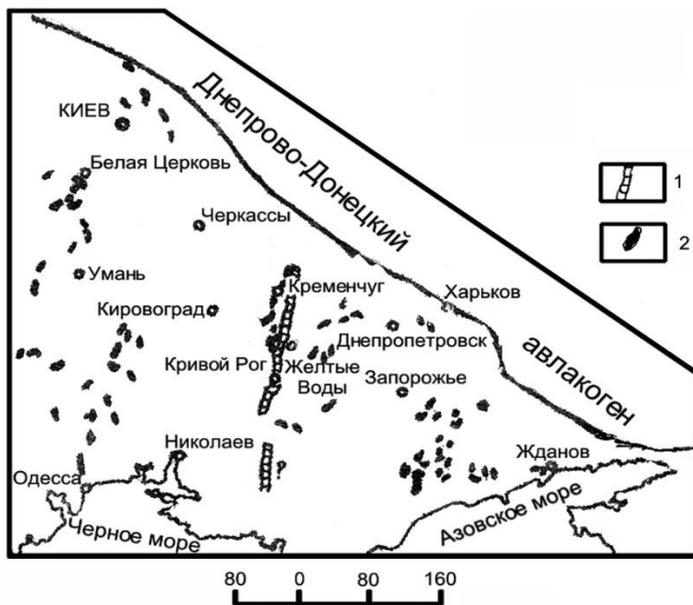


Рис. 11. Криворожский железорудный бассейн. Основные запасы богатых железных руд со средним содержанием 57.6 % (1.7 млрд т), магнетитовых (запасы 11.6 млрд т) и немагнитных железистых кварцитов (2.6 млрд т) приурочены к первичноосадочным образованиям криворожской серии нижнего протерозоя. По [36], с изменениями. 1 – магнитные аномалии, связанные с образованиями железорудной криворожской серии нижнего протерозоя; 2 – то же, с архейскими породами.

[Fig. 11. Krivoy Rog iron ore basin. The main reserves of high-grade iron ores with an average content of 57.6% (1.7 billion tons), magnetite (reserves 11.6 billion tons) and non-magnetic ferruginous quartzites (2.6 billion tons) are confined to the primary sedimentary formations of the Krivoy Rog series of the Lower Proterozoic. According to the study [36], with modifications. (1) – magnetic anomalies associated with the formations of the Krivoy Rog iron ore series of the Lower Proterozoic; (2) – the same with Archean rocks.]

Разведанные запасы железистых кварцитов со средним содержанием Fe 34.2 % составляют 16.6 млрд т (до глубины 500–800 м), в т.ч. магнетитовых 13.8 млрд т, богатых железных руд со средним содержанием Fe 56.7 % (до глубины 1500 м) – 1.1 млрд т [36]. Но в Государственном балансе полезных ископаемых Украины [37] учтены запасы железных руд в размере 28491.2 млн тонн. Они сосредоточены в 52 месторождениях, из которых ныне разрабатываются 24. Кроме того, разведаны запасы железных руд объёмом в 10.8 млрд тонн, не включённые в Госбаланс.

Основной рудной толщей является саксаганская свита криворожской серии нижнего протерозоя мощностью до 2 км. Она содержит до 7–8 пластов джеспилитов, хотя иногда их число не превышает 2–3. По гематитовым, магнетитовым, гематит-магнетитовым разностям железистых кварцитов (их до 20 % от всего количества кварцитов бассейна) может быть развита зона окисления мощностью до ста метров, а иногда до 1 км и более [38].

Широкое развитие в палеопротозое деятельности цианобактерий способствовало накоплению O₂ не только в водных бассейнах, но и в атмосфере. Накопление в ней этого газа привело к Великому кислородному событию (2.4–2.3 млрд лет). Увеличение количества кислорода в атмосфере явилось причиной перевода железа из подвижной двухвалентной формы в неподвижную трехвалентную, и оно не могло транспортироваться из кор выветривания в морские бассейны. Следствием было практическое исчезновение джеспилитов из разрезов верхнего карелия.

Неопротерозойский этап В позднем докембрии, в интервале 0.85–0.74 млрд лет произошла новая вспышка железнакопления в специфических условиях холодного климата. Аккумуляции железа и связанные с ней месторождения известны во многих районах Мира (рис. 12).

Чумаков Н. М. в неопротерозе (верхний рифей + венд) выделяет 6 гляциопериодов [40]: Кайгас – 760 и 740 млн лет; Рэпитен, – возможно, 725 и 700 млн лет; Стерт – > 663 и 650 млн лет; Марино – < 657 и 635 млн лет; Гаскье – < 584 и 582 млн лет; Байконур, – по комбинации радиоизотопных и биостратиграфических данных, < 549 и 542, а возможно, и 533 млн лет соответственно. В каждом из них по составу отложений отмечаются ледниковые и межледниковые эпохи. Но значительные аккумуляции ВИФ (ГИФ) преимущественно тяготеют к разрезам ледниковых периодов Рэпитан и Стерт.

На северо-западе Канады и западе Аляски широко развиты породы группы Рапитан, относящиеся к криогению неопротерозоя. Они представлены ледниковыми отложениями мощностью от первых десятков до 700 м, залегающими на переслаивающихся диамиктитовых кластитах и основных туфах, и перекрытыми доломитами эдиакария. Образования группы состоят из гематит-яшмовых ритмитов в гляциоморской последовательности диамиктитов и аргиллитов. Гляциальные пелиты и алевриты, включают обломочный материал гравийной и валунной размерности эрратического происхождения [41–44]. Обломки испещрены гляциальными бороздами, имеют различный, но преимущественно доломитовый состав. Породы обычно тяготеют к подвижным поясам и преобразованы в зеленосланцевой фации метаморфизма.

Микститы содержат многочисленные гематитовые слои ВИФ фиолетового и красного цветов мощностью, которые чередуются с безрудными (рис. 13, а, в). В них также присутствуют эрратические включения. Учитывая специфику генезиса этих пород, многие авторы называют эту формацию гляциально-полосчатой (ГИФ). Мощности рудных толщ от 10 см до 10 и более метров.

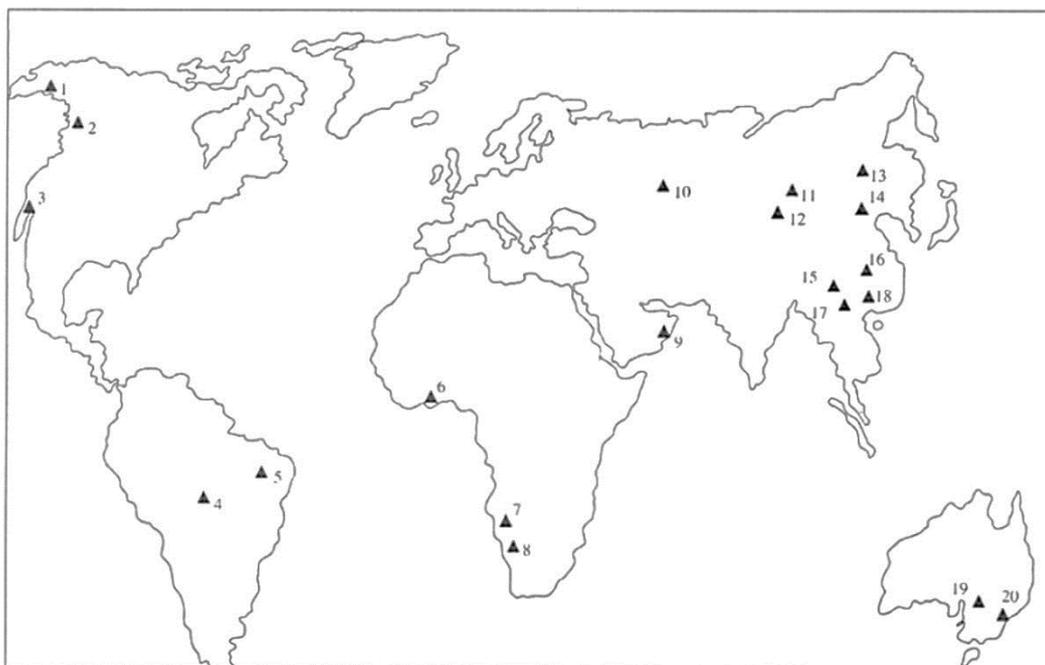


Рис. 12. Размещение неопротерозойских железистых кварцитов. По [39]. 1 – формация Тиндир, Аляска (США), 2 – группа Рапитан (Канада), 3 – формация Кингстон Пик (Калифорния), 4 – серия Джакодиго (Бразилия), 5 – серия Урукун (Бразилия), 6 – Гаро (Того), 7, 8 – ороген Дамара (Намибия): 7 – серия Чуос, 8 – серия Дамара, 9 – месторождение Джазир (Оман), 10 – Яматинское месторождение (Бурятия), 11 – проявление Бурен (Тува), 12 – Эрзинский бассейн (Тува, Монголия), 13 – рудоносная свита Малого Хингана, 14 – рудоносная свита оз. Хингана (Россия), 15–18 – железистые кварциты платформы Янцзы (15, 16 – северный, 17, 18 – южный пояса), 19 – серия Юдиамутана (Австралия), 20 – месторождения «геосинклинали» Аделаида.

[Fig. 12. Placement of Neoproterozoic ferruginous quartzites. According to the study [39]. (1) – Tindir Formation, Alaska (USA), (2) – Rapitan group (Canada), (3) – Kingston Peak formation (California), (4) – Jacodigo series (Brazil), (5) – Urukun series (Brazil), (6) – Garo (Togo), (7, 8) – Damara orogen (Namibia): (7) – Chuos series, (8) – Damara series, (9) – Jazir field (Oman), (10) – Yamatinskoye field (Buryatia), (11) – Buren manifestation (Tuva), (12) – Erzin basin (Tuva, Mongolia), (13) – ore-bearing formation of the Lesser Khingan, (14) – ore-bearing formation of Khingan Lake (Russia), (15–18) – ferruginous quartzites of the Yangtze platform (15, 16) – northern, (17, 18) – southern zone), (19) – Yudiamutana series (Australia), (20) – Adelaide “geosyncline” deposits.]

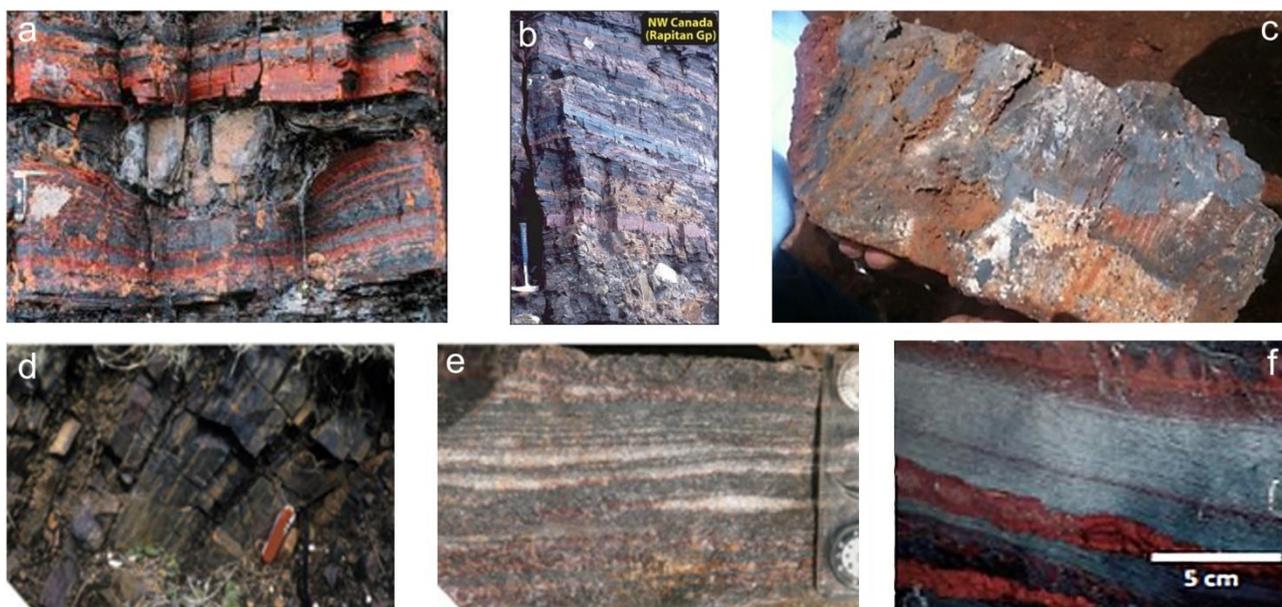


Рис. 13. Рифейские BIF, в т. ч.: a-b – район Рапитан, Канада, эрратические валуны [41], c – ЭльМутун, Боливия [42], d – свиты Йербаль (Yerbal), Уругвай [43], e – формации Жукуруту (Jucuruto), СВ Бразилия [43], f – ЖКФ Египта [44].

[Fig. 13. Riphean BIFs, including: (a-b) – Rapitan region, Canada, erratic boulders [41], (c) – El Mutun, Bolivia [42], (d) – Yerbal formation, Uruguay [43], (e) – Jucuruto formation, NE Brazil [43], (f) – ferruginous-silicious formations of Egypt [44].]

Слойки гематитовых руд и разделяющие их кварцевые имеют мощность в первые миллиметры. Содержание железа в рудных толщах от 15 и более, обычно 33–50 %, и сильно изменяются как по разрезу, так и по площади [45].

На территории Южной Америки аналоги ВIF района Рапитан известны в районе Урукум на территории юго-востока Боливии, Бразилии и Уругвае, где разведан ряд месторождений железа и марганца. Самым крупным и уникальным из них является Эль-Мутун в Боливии с запасами свыше 40 млрд т железных и порядка 10 млрд т марганцевых руд [42.]. Выделяются коренные руды с содержанием 43–45 % и их богатые разности (до 57 %) в КВ мощностью в десятки метров.

Железородная толща залегает среди диамиктитов серии Жакадиго [46], а её породы содержат заметно больше эрратического материала (рис. 13 с), чем аналогичные образования района Рапитан в Северной Америке. Другим отличием является наличие мощной пачки марганцевых руд в основании железородной толщи. Последняя прослежена на территориях Бразилии и Уругвая (рис. 13 d, e), где также имеются подобные месторождения, но гораздо меньших масштабов. Возраст пород серии – 755–735 млн лет [47].

Руды представляют собой пачки тонкого переслаивания оксидов железа и кварца. Слоистость нарушается включениями эрратического материала различного размера – от алевритового до валунного. Почти все железо присутствует в виде гематита. В незначительных количествах имеются магнетит, сидерит, минералы марганца – браунит, криптомелан, пиролюзит.

По данным работы [48] значения $\delta^{13}\text{C}$ карбонатов в Урукуме низкие, от -5.2 до -7.0 промилле, что отражает их отложение в ледниково-морской обстановке. Концентрации РЗЭ в БИФ, как и в трех образцах формации Мп, очень близки и почти полностью лишены положительных Eu аномалий (относительно NASC). Это резко контрастирует с ярко выраженными положительными Eu аномалиями архейских и раннепротерозойских железистых образований.

Залежи находятся в железно-марганцевом поясе Мутун-Тукавака северо-западного простирания и площадью 230 км x 30 км [49]. Помимо Эль Мутун подобные образования оконтурены в рудных районах Боливии Серро Рохо, Серро Колорадо-Мурсьелаго. Все они приурочены к грабенам бассейна Тукавако. Их первичные осадки, полагают местные авторы, формировались в фиордах в ледниковых условиях.

Неопротерозойские полосчатые железные образования развиты в поясе Дамара в южной Африке. Они относительно ограничены по размеру, с горизонтальной протяженностью не более нескольких десятков километров и толщиной не более 10 метров. По данным работы [50], включающие ВIF гляцио-морские осадочные породы формации Гауб в центральной Намибии содержат прослойки основных потоков лавы и тонкие пласты кислого пепла. U-Pb геохронология циркона пеплового слоя ограничивает отложение гляциоморских отложений до 635.5 ± 1.2 млн лет, обеспечивая

возраст того, что было описано как оледенение «мариноанского типа» на границе криогенного и эдиакарского периодов. В сочетании с надежными возрастными ограничениями по другим неопротерозойским ледниковым единицам – Пачка Губра 713 млн лет (Оман) и формация Гаскьерс 580 млн лет (Ньюфаундленд) – эти данные однозначно свидетельствуют как минимум о трех дискретных по времени ледниковых эпизодах в неопротерозое с межледниковыми интервалами (положительные отклонения $\delta^{13}\text{C}$), длительностью не более 50–80 млн лет. В межледниковые интервалы и происходило формирование полосчатых железистых формаций.

Оледенение на территории Намибии распространялось на север до территории Конго, где развит Большой Конгломерат Катанги древнее 735 и моложе 765 млн лет (U-Pb SRIMP, цирконы из вышележащих и нижележащих лав [51]). Это время гляциопериода Кайгас, отложения которого представлены метаморфизованными породами марино- и флювиогляциальных фаций, которым местами подчинены железородные горизонты [52].

На территории Аравийско-Нубийского щита в центральной части Восточной пустыни Египта имеется ряд неопротерозойских месторождений ВIF с общими запасами 53 млрд т [53]. Их возраст 0.75–0.65 млрд лет. Выделяются первичные железные руды с чередующимися слоями магнетита и кварца и вторичные гематитовые коры выветривания фанерозоя. Первичные руды слагают ритмично построенные слои, их группы и отдельные линзы с максимальной мощностью до 100 м, переслаивающиеся с покровами андезитов, их туфов, базальтовыми пирокластитам. Все породы сильно деформированы, регионально метаморфизованы в фациях от зеленосланцевой до амфиболитовой. Формирование железных руд происходило в подвижных поясах трогового типа (малые подвижные пояса), которые были закрыты в результате Панафриканского орогенеза в конце венда. Т.е. прямых доказательств ледникового генезиса этих ВIF пока не обнаружено, что позволяет авторам работы [3] говорить об особом типе железнакопления в неопротерозое вне ледниковых областей.

Неопротерозойские ледниковые отложения Австралии, распространенные в Аделаидской геосинклинали, включают породы надгруппы Юднамонта мощностью около 5 км. Они сформировались в гляциопериод Стерт и представлены сланцами с линзами диамиктитов и обильными включениями друпстоунов. С севера на юг в центральной части разреза надгруппы рассмотренные породы по простиранию замещаются гематитовыми сланцами Халоуилена, переслаивающимися с диамиктитами [54]. Значимые аккумуляции ВIF имеются на юго-востоке геосинклинали Аделаида.

Крупные аккумуляции железистых кварцитов имеются на Южно-Китайской платформе (Янцзы). По данным работ [55, 56] на доледниковых глинистых аргиллитах и песчаниках формации Лянтоу залегают ледниковые образования формации Чонган (рис. 14) гляцио-

периода Рапитан. Они перекрываются интергляциальной рудоносной формацией Фулу (гляциопериод Стерт), сложенной песчаниками и сланцами, включающими несколько пластов гематитовых руд и базальтов. В верхах разрезов формации отмечаются пласты оксидных руд марганца и дробстоуны различного размера. Выше залегают отложения формации Наньто, сходные с таковыми формации Чонган и образованные в наиболее интенсивное оледенение Марино. Породы всех формаций метаморфизованы в зеленосланцевой фации. С размывом залегающие выше доломиты и известняки формации Душаньто формировались в условиях теплого гумидного климата.

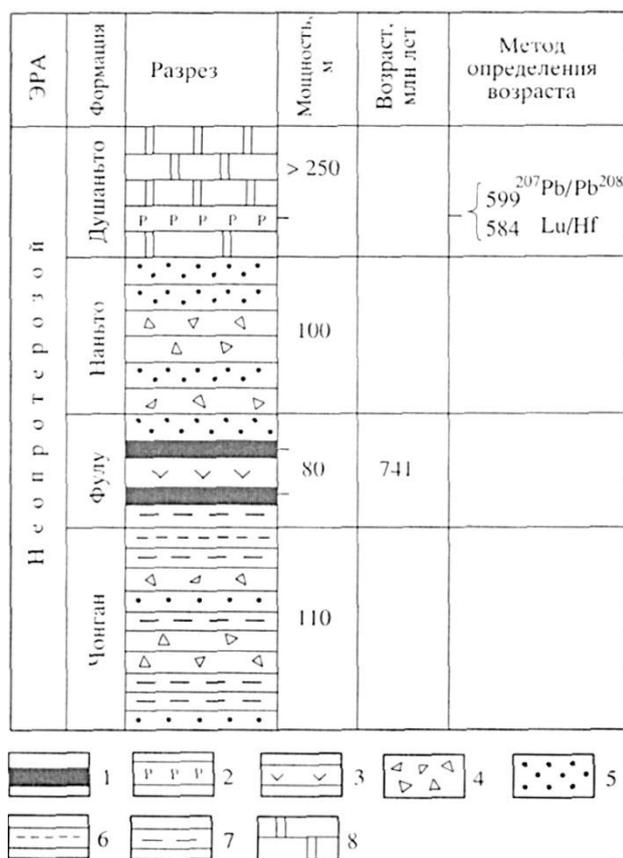


Рис. 14. Сводный разрез ледниковых отложений платформы Янцзы По [39, рис. 3]. 1 – железистые кварциты, 2 – фосфориты, 3 – базальты, 4 – тиллиты и диамиктиты, 5 – флювиогляциальные песчаники и гравелиты, 6 – метаморфизованные глины, 7 – серицитовые и хлоритовые сланцы, 8 – доломиты и известняки.

[Fig. 14. Summary section of glacial deposits of the Yangtze Po platform [39, fig. 3]. (1) – ferruginous quartzites, (2) – phosphorites, (3) – basalts, (4) – tillites and diamictites, (5) – fluvioglacial sandstones and gravelites, (6) – metamorphosed clays, (7) – sericite and chlorite shales, (8) – dolomites and limestones.]

В пределах платформы Янцзы выделяется северный и южный железорудные пояса (см. рис. 12), протягивающиеся на расстояния 1300 км каждый. В их пределах имеется ряд крупных эксплуатирующихся месторождений, составляющих основу добываемых руд в Китае. Они находятся в пластах BIF, мощность

которых варьирует и может достигать 60 м. Содержание Fe изменяется по площади и разрезу, составляя около 50 %. Такие содержания, вероятно, обусловлены обогащением первичных руд при выветривании в фанерозое.

Значительно меньше по размерам Эрзинский железорудный бассейн, расположенный на территории Тувы и Монголии и протяженный на несколько сотен километров. Здесь в ледниковых отложениях имеется два сближенных железорудных пласта, прослеженных на 60 км [39]. Разведано пока Мугурское месторождение с запасами Fe 300 млн т при бортовом содержании Fe 37 %.

Аккумуляции железа в неопротерозойских ледниковых образованиях известны на Восточном Тянь-Шане в хребте Джетымтау, в Центральном Казахстане [57], на юге Дальнего Востока – в Буреинском, Хангайском, Омолонском массивах и Мало-Хингайском районах [58], Центральной Монголии [39]. Они обычно тяготеют к подвижным поясам, породы в них метаморфизованы в зеленосланцевой и амфиболитовой фации, запасы разведанных запасов редко превышают первые сотни миллионов тонн.

Помимо железных руд, связанных с ледниковыми формациями, формировались и другие генетические типы этих пород. Так в Северо-Восточном Китае, в пределах металлогенического пояса Джиси, известны аккумуляции BIF, связанные с кондалитами. Последние являются метаморфогенными аналогами глиноземистых осадков неопротерозоя, содержат графит, сидерит и карбонаты. Они формировались в мелководно-морских изолированных бассейнах. Наиболее известные месторождения пояса – Шуаньгыашань, Люмао, Донгфеньшань. находятся среди карбонатных пород и вулканокластитов, метаморфизованных в фациях зеленосланцевой и низких ступеней амфиболитовой. Так на месторождении Шуаньгыашань пласты джеспилитов согласны с вмещающими сидеритовыми сланцами, и гнейсами, мраморами. Основная залежь длиной 2169 м и 8 м мощностью с содержанием Fe 30 % прослежена по падению на 520 м [9 и ссылки в ней]. Руды полосчатые, массивные, содержат магнетит, гематит, шеелит, кварц, авгит, диопсид.

Ещё один генетический тип представляют прибрежно-морские оолитовые гематитовые руды Ангаро-Питского железорудного бассейна, расположенного на юге Красноярского края в междуречье Ангары и Большого Пита. Рудные залежи прослежены на 18.5 км по простиранию и на 400–500 м по падению. Мощность их изменяется от 4–5 м до 15–20 м. Здесь разведаны Нижнеангарское, Удоронговское и Ишимбинское месторождения и выявлен ряд рудопроявлений гематитовых руд. Рудный горизонт (в среднем 50–80 м) состоит из 11 пачек, каждая из них сложена рудным и безрудным пластами (0.4–20 м), простирающимися от 0.3 до 14 км. Рудные залежи пластообразной формы с углами падения 45–65°. Основные разновидности руд: гематитовые, гематит-песчаные, хлорит-гематитовые, гематит-сидеритовые. Балансовыми считают

руды с содержанием 30–50 % железа. Главные рудные минералы – гидрогематит, гематит и гётит, присутствуют магнетит и сидерит. Залежи гематитовых руд приурочены к низам верхнепротерозойской терригенной рудоносной свиты среднего рифея. Руды не содержат ни вредных, ни легирующих примесей. Общие запасы около 1 млрд тонн.

Неопротерозойские железорудные образования BIF (в некоторых публикациях их называют GIF) формировались при распаде суперматерика Родиния в изолированных трогообразных прогибах. Сначала в анкислородных условиях накапливалось двухвалентное железо, а при таянии ледников в межледниковья и возобновлении связи с Мировым океаном с насыщенными O_2 водами оно переводилось в трехвалентное и в виде гидроокисей выпадало в осадок с аккумуляцией этого металла [59]. Во внеледниковых зонах в прибрежно-морских условиях в небольших объёмах начали формироваться оолитовые гетит (гематит)-шамозит-сидеритовые руды.

Фанерозойский этап. Если в архее и протерозое железонакопление было сосредоточено в отдалённых частях палеоводоёмов, где осаждались железокремнистые осадки, превратившиеся затем в джеспилиты, то в фанерозое оно смещается в прибрежно-морские зоны и на сушу. В первом случае образуются оолитовые железные руды, сложенные гетитом, шамозитом и сидеритом, во втором – ФКВ с рудами, сложенными обычно гематитом, гидрогематитом, гетитом, гидрогетитом, лепидокрокитом, магнетитом.

Среди прибрежно-морских образований авторы ра-

бот [60–62] с использованием других публикаций выделяют кремнисто-сланцевые, карбонатно-терригенные и терригенно-глинистые типы вмещающих железные руды пород. Первые преимущественно приурочены к палеозою, вторые к мезозою и третьи к кайнозою. Вместе с тем выделяются более узкие интервалы железонакопления, связанные с выравниванием территорий и массовым поступлением железа с суши. Оно может накапливаться в аллювиальных, озерно-болотных, лагунных отложениях, но основная его масса оседает в прибрежно-морских обстановках, давая его крупные аккумуляции.

Оолитовые железные руды **раннего палеозоя** широко представлены на Северном Урале, востоке Тунгусской синеклизы, в Тюрингии, Португалии, Франции, Чехии, и других регионах, где имеют ордовикский возраст [63 и ссылки в ней]. Часть железорудных залежей осадочного генезиса Нормандии, Тюрингии, Богемии – нижнесилурийская. На многочисленных месторождениях Нормандии и Бретани (Армориканский срединный массив) железорудные залежи обнаруживают не только среди пород ордовика, но и в нижнедевонской части разрезов.

Нижнесилурийские (лландоверийский ярус) гематитовые руды железорудного района Бирмингем в Алабаме (США) образуют три горизонта: Айда-Сим (Хикори-Нат), Биг-Сим, Айрон-Дейл в составе формации Ред-Маунтин. Среди «красных железных руд» (рис. 15), как их там называют, различаются типы «ископаемых» и «оолитовых» руд. Основным их минералом является гематит с примесью известковистого и

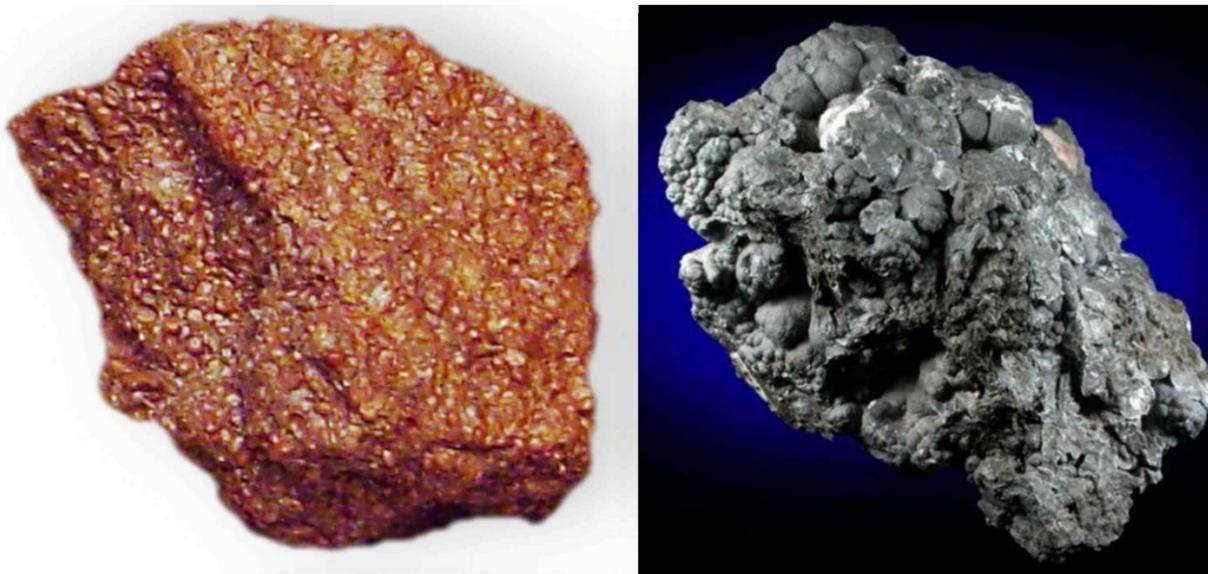


Рис. 15. Гематитовые руды лландоверийской формации Клинтон, округ Онейда, штат Нью-Йорк. Слева – типичная оолитовая руда, подвергнутая выветриванию. Справа – исходная руда, темная серая масса раскристаллизованного гематита. Она была метаморфизована в зеленосланцевой фации. Её первично оолитовое происхождение обнаруживается по сферическому облику частных конкреций. На сколах гематитовых сферул заметна их радиальная текстура. Образец 80 x 60 x 40 мм. Из работы [64].
[Fig. 15.] Hematite ores of the Llandoverian Clinton Formation, Oneida County, New York. On the left is a typical weathered oolite ore. On the right is the original ore, a dark grey mass of crystallized hematite. It was metamorphosed into the greenschist facies. Its primary oolitic origin is revealed by the spherical appearance of partial concretions. On chipped hematite spherules, their radial texture is noticeable. Sample 80 x 60 x 40 mm. According to the study [64].]

доломито-известковистого материала. В «ископаемых» рудах гематит замещает многочисленные остатки брахиопод, криноидей, кораллов, мшанок. Оолитовые руды образуют плоскоокруглые зерна размером с льняное семя. В центре каждого оолита присутствует зерно кварца, покрытое многочисленными разными по составу слойками от дневной поверхности вглубь «мягкие» руды сменяют «твердые». Мягкие разности были созданы выветриванием при выносе известковистой составляющей. Металлического железа в товарных рудах 32–45 %, извести – 5–20 %, кремнезема – 2–25 %, глинозема – 2–5 %, магнезии – 1–3 %, фосфора – 0,25–1,5 %, серы – до 0,5 %, воды – 0,5–3 %, марганца – менее 0,25 %. По представлениям Т.А. Симпсон и Т.Р. Грей [64, с. 64–75], железистые оолиты возникли на прибрежном мелководье. Во время сильных волнений водной среды полуокатанные зерна перемещались и вокруг каждого нарастали оболочки и пленки окислов-гидроокислов, поступающие из морских водокислов железа, пленками глиноземистого и кремнеземистого составов.

Присутствие в составе фауны карликовых форм связано с угнетающим воздействием слишком железистых морских вод. Гематитовое железо входило в состав биоса только после гибели организмов. То же допускается и для оолитов – их обычные известковые с кремнистыми ядрами формы на морском дне лишь позднее замещались с поверхности гематитом, впрочем, как и иной имевшийся рядом карбонатный материал. Железорудное осадконакопление происходило на пологом прибрежном шельфе. Обилие карбоната Са и окислов Fe в бассейне объяснено их сносом с прилегающих площадей при мягком тропическом-субтропическом климате. Особую контролирующую роль в минерогенетическом процессе играли линейно расположенные барьерные рифы.

Авторы отмечают зональность: 1 – с лагунной стороны намытых прибрежными юго-западными течениями поднятий отлагались кальцит-гематитовые осадки; 2 – с морской стороны распространялись менее окисные сидерит-шамозитовые осадки; 3 – сидерит-шамозитовые осадки к юго-востоку переходили в глины; 4 – на северо-восток кварц-гематитовые песчаники рифов сменяли безжелезистые пески. Подобные богатые гематитовые руды лландоверийского яруса нижнего силура известны и в штате Нью-Йорк. Нижнесилурийские гематит-сидерит-шамозитовые железные руды в Канаде (Ньюфаундленд) добывают на месторождении Вабана.

В *позднем палеозое*, со *среднего девона* на континентах распространяются промышленные месторождения железа КВ, обусловленные разложением материнских пород с участием органики. Заметное развитие получают бурые озерно-болотные железняки и оолитовые морские железные руды. Богатые железные руды широко развиты в КВ джеспилитов на Лебединском, Стойленском, Михайловском и других месторождениях КМА (рис. 16). БЖР первого имеют мощность от 1 до 90 м, в среднем 19,7 м, состоят из

мартита, гетита, гидрогетита, сидерита, иногда железной слюдки, гидрогематита, магнетита. Среднее содержание Fe_2O_3 – 57,5; SiO_2 – 6,0; S – 0,16; P – 0,09 %. Но в настоящее время БЖР в контурах карьеров практически отработаны, а добываются легкообогатимые железистые кварциты с Fe_2O_3 31–33 %.

Крупные месторождения богатых железных руд приурочены к КВ железистых кварцитов *раннекаменноугольного возраста* в Белгородском районе КМА (рис. 17), на Яковлевском, Мелихово-Шебекинском, Гостищевском, Большетроицком, Висловском, Разуменском, Олимпийском

и других месторождениях. Богатые руды сплошным чехлом покрывают выходы железистых кварцитов под раннекаменноугольной поверхностью и образуют плащевидные залежи длиной от 5 до 33 км, шириной 100–500 м и до 3000 м в сложных складчатых участках. Средняя мощность залежей колеблется от 30 до 125 м. Они разделяются полосами выветрелых сланцев шириной до 200 м и перекрыты осадочной толщей мощностью от 400 до 800 м. Подошва залежей представлена окисленными железистыми кварцитами, кровля – переотложенными железными рудами, глинами и известняками визейского яруса. На межрудных сланцах сформировалась разновозрастная бокситоносная КВ (см. рис. 17).

Главными породообразующими минералами железных руд являются мартит, железная слюдка, тонкочешуйчатый гематит и гидроксиды железа (рис. 18). Они наследуют от железистых кварцитов послонное распределение, что обуславливает тонко- и среднепосчатую текстуру руд. В небольших количествах присутствуют кварц, каолинит, бемит, гиббсит, монтмориллонит и другие остаточные или новообразованные минералы КВ. В рудах имеются также наложенные инфильтрационные кальцит, анкерит, арагонит, сидерит, шамозит. Их содержание уменьшается от кровли к подошве, что приводит к постепенному снижению крепости руд и переходу их в рыхлые «синьки». Тела богатых руд линейного типа приурочены к зонам дробления и контактам железистых кварцитов со сланцами. Залежи крутопадающие, неправильной клиновидной формы, протяженностью до 6 км, мощностью до 600 и более метров.

Выделяются рыхлые (белгородский) и плотные (стойленский типы) типы руд. Первые представлены мартитовыми, железнослюдко-мартитовыми, мартит-железнослюдковыми и меньше гидроксид-мартитовыми разностями, характеризуются высокой пористостью и представляют собой рыхлую порошокватую массу (синьки) в отличие от нешироко развитых мартит-гидрогематит-гидрогетитовых руд (краски), сложенных глиноподобными разностями [67].

Плотные руды развиты в приповерхностных частях залежей, мощность их до 25 м, иногда больше. Они цементированы инфильтрационными минералами (сидеритом, хлоритом, кальцитом, сульфидами) рыхлых руд с образованием карбонатизированных и хлоритизированных их разностей. Кроме того, к стойленскому

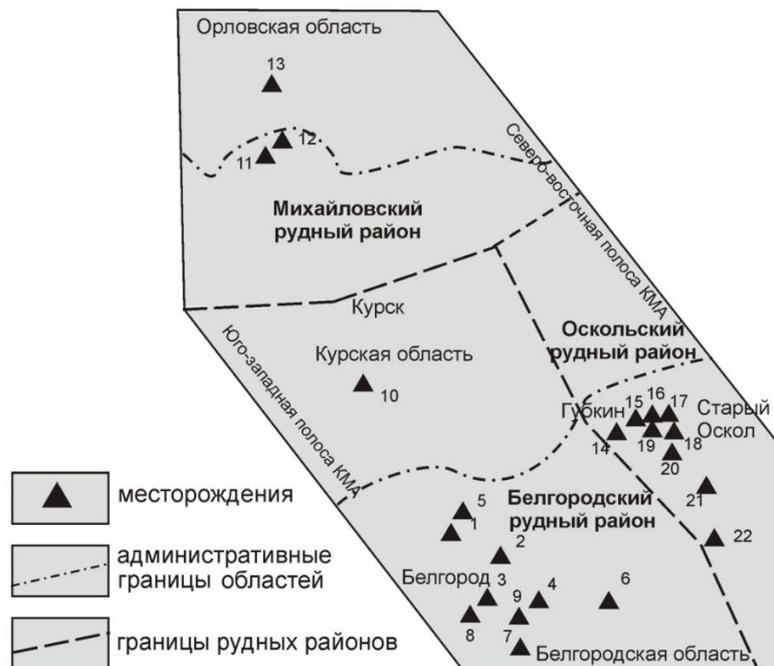


Рис. 16. Схема расположения основных железорудных и бокситовых месторождений КМА: 1 – Яковлевское; 2 – Гостищевское; 3 – Вислоевское; 4 – Мелихово-Шебекинское; 5 – Ольховатское; 6 – Большетроицкое; 7 – Разуменское; 8 – Олимпийское; 9 – Соловьёвское; 10 – Дичнянско-Реутское; 11 – Михайловское; 12 – Курбакинское; 13 – Новоялтинское; 14 – Осколецкое; 15 – Коробковское; 16 – Лебединское; 17 – Стоило-Лебединское; 18 – Стойленское; 19 – Салтыковское; 20 – Приоскольское; 21 – Чернянское; 22 – Погромаецкое.

[Fig. 16. Layout of the main iron ore and bauxite deposits of the KMA: (1) – Yakovlevskoe; (2) – Gostishchevskoe; (3) – Vislovskoe; (4) – Melikhovo-Shebekinskoe; (5) – Olkhovatskoe; (6) – Bolshetroitskoe; (7) – Razumenskoe; (8) – Olympic; (9) – Solovyovskoe; (10) – Dichnyansko-Reutskoe; (11) – Mikhailovskoe; (12) – Kurbakinskoe; (13) – Novoyaltinskoe; (14) – Oskoletsckoe; (15) – Korobkovskoe; (16) – Lebedinskoe; (17) – Stoilo-Lebedinskoe; (18) – Stoilenskoe; (19) – Saltykovskoe; (20) – Prioskolskoe; (21) – Chernyanskoe; (22) – Pogrometskoe.]

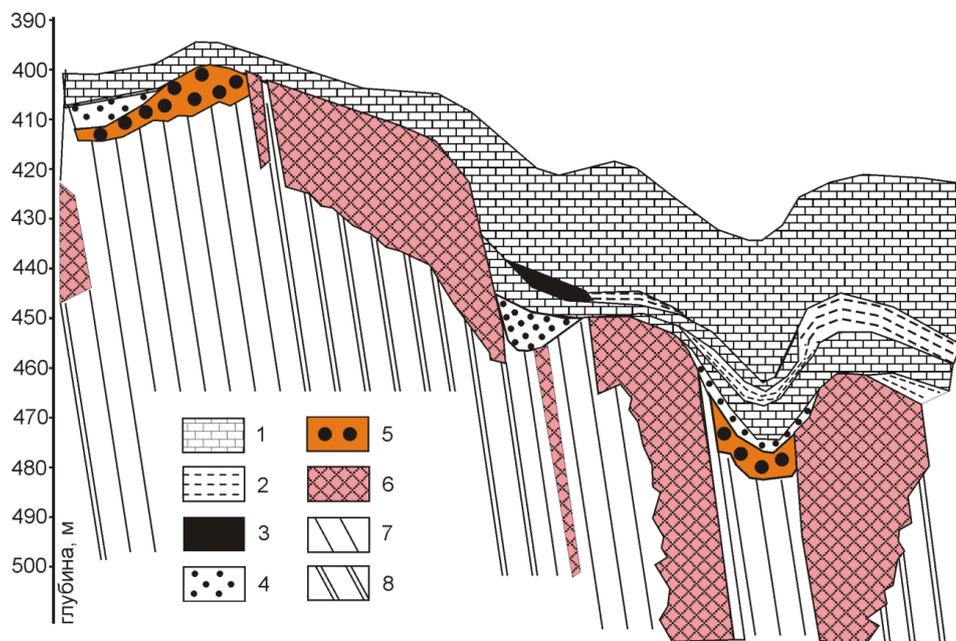


Рис. 17. Схематический геологический разрез КВ Мелихово-Шебекинского месторождения. Условные обозначения: Осадочный чехол (С_{1v}): 1 – известняки органогенно-обломочные; 2 – глина; 3 – уголь; 4 – железорудная конгломератобрекчия; 5 – бокситы; 6 – БЖР; 7 – железистые кварциты; 8 – сланцы и алеврофиллиты. Из работы [65].

[Fig. 17. Schematic geological section of the WCs of Melikhovo-Shebekinskoye deposit. Legend: Sedimentary cover (C_{1v}): (1) – organogenic-clastic limestones; (2) – clay; (3) – coal; (4) – iron ore conglomerate breccia; (5) – bauxite; (6) – HGIO; (7) – ferruginous quartzites; (8) – shales and siltstones. According to the study [65].]

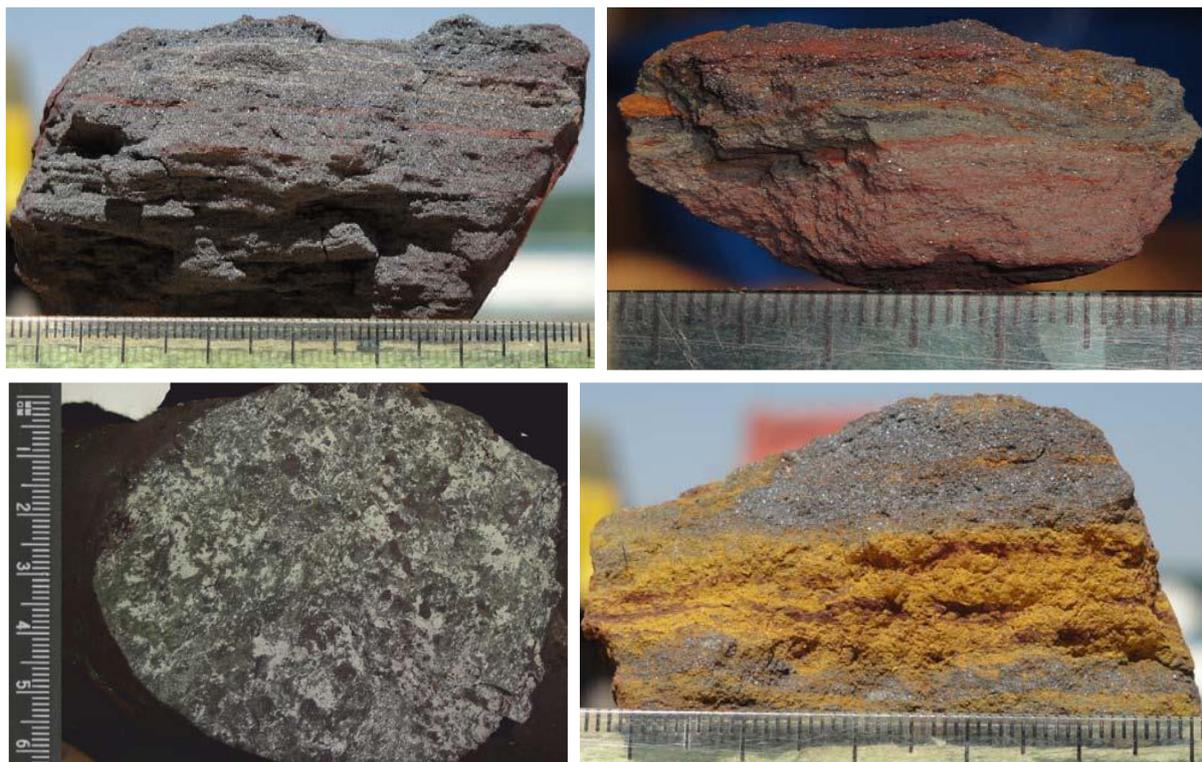


Рис. 18. Минеральный состав богатых железных руд Большетроицкого месторождения. Вверху слева – мартитовая разновидность руд, представленных глиноподобными разновидностями со слоистой текстурой. Красные прослойки – тонкодисперсный гематит. Вверху справа – лимонитизация мартитовой породы. Внизу слева – гетит (бурое). Внизу справа – бертьерин (зеленоватая и сероватая масса). Из работы [66].

[Fig. 18. The mineral composition of the high-grade iron ores of the Bolshetroitskoye deposit. Top left is a martite variety of ores, represented by clay-like varieties with a layered texture. The red layers are finely dispersed hematite. Limonitization of martite rock is shown in the top right. Goethite (brown) is shown in the bottom left. Berthierine (helenish and greyish mass) is shown in the bottom right. According to the study [66].]

типу относятся все переотложенные руды в основании перекрывающих их осадочных пород. Плотные руды после дробления и усреднения могут сразу использоваться в доменном процессе, тогда как рыхлые руды требуют агломерации. В составе богатых руд белгородского типа, имеющих большое промышленное значение, общее железо составляет (%): Fe_2O_3 56.4–61.3; SiO_2 4.1–9.4; Al_2O_3 2.0–3.0; TiO_2 0.18–0.8; S 0.15–0.32; P 0.026–0.03; п.п.п. – 2.8–6.33. Химический и минеральный составы руд, а также физическое состояние позволяют простое дообогащение с целью получения высококачественных концентратов и дальнейшего использования в качестве основного сырья для электрометаллургии.

В Белгородском рудном районе сосредоточено около 85 % всех разведанных и 90 % прогнозных запасов богатых железных руд КМА [35], на их долю по отдельным разведанным месторождениям приходится 50–85 % запасов (остальное железистые кварциты). Общие запасы богатых железных руд КМА 12 млрд тонн.

Сравнительный анализ БЖР девонского (Михайловский и Старо Оскольский рудные районы) и раннекаменноугольного (Белгородский рудный район) возрастов [65, 68] показал, что формирование в КВ аккумуляций железа развито практически по всему профилю выветривания. Оно начинается в зоне гидра-

тации и начального гидролиза (иллитовой и иллит-каолинитовой на межрудных сланцах) и продолжается в зоне конечного гидролиза (полторных окислов на сланцах), где мощности и степень разложения материнских пород резко возрастают. Такая КВ развита под каменноугольными образованиями Белгородского рудного района, где наряду с БЖР разведаны месторождения бокситов. При этом установлена большая роль биологического, преимущественно бактериального, фактора при выветривании [69–70].

В мезозое, в течение большей части юрского периода (180–130 млн лет), в осадочных бассейнах Западной Европы (Люксембург, Франция, Чехия, Германия, Бельгия, Великобритания) накопились оолитовые железные руды гематит-сидерит-шамозитового состава [71, 72]. Пласты руды мощностью до 7 метров в разрезах переслаиваются с мергелями, песчаниками, сланцами. Они содержат 30–35 % железа и 0.2–2 % фосфора. Запасы руд значительны, около 6 млрд т.

Юрские оолитовые руды Лотарингии концентрируются в пяти крупных мульдах [73]. Они обнажены в восточной части бассейна и существенно погружены в его западной части, где прослежены бурением до глубины 800 метров. Подстилают руды юрские песчаники, перекрывают – юрские мергели. Руды (гётит, стильпносидерит – фосфористый гель окислов железа,

железистый хлорит, сидерит) характеризуются малыми размерами оолитов, обычно в доли мм и не более одного мм. Залежи прослежены в полосе протяженностью 120 км при ширине 20–30 км. Средняя мощность железорудной пачки составляет 30 м, но она варьирует от 10 м до 60 м. В ее разрезе различают в среднем семь железорудных пластов по 2–10 м мощностью каждый. Иногда их количество сокращается до 4 или возрастает до 12. Концентрации Fe в рудах – 30–35 %, Mn – 5 %, P – 0.6–1.8 %, S – 0.01–0.4 %. Особая ценность руды «серого пласта» мощностью 3–9 м, с понижающим температуру плавки карбонатным цементом.

Комплексные месторождения осадочных хромоникелевых железных руд Орско-Халиловского района, имеющих позднетриасовый возраст, находятся на Южном Урале. Группа месторождений протягивается в виде цепочки, образуя меридионально вытянутую полосу, которая прослеживается на 50–60 км. С севера на юг расположены Ново-Петропавловское, Георгиевское, Ново-Киевское, Промежуточное, Мало-Халиловское, Орловское месторождения. Еще южнее находится Аккермановское, а восточнее – Ново-Троицкое. Исходным материалом для образования этих месторождений послужили продукты размыва железистых пород КВ латеритного типа, которая фиксируется на гипербазитах Среднего и Южного Урала. В настоящее время эти месторождения либо отработаны, либо добыча в них руд нерентабельна.

Киммерийский возраст имеют известные Липецкие и Тульские месторождения бурых железняков [15]. Все они были в Петровские времена важной минеральной базой для зарождавшейся российской металлургии. Залежи устанавливаются на водораздельных пространствах, имеют мощность первые метры, по трещиноватым зонам до 15 м. Давно доказано, что эти руды образовались путем выветривания известняков [72].

На Украине известны 73 месторождения железных руд, эксплуатируется 23 [36]. На 13 добываются богатые руды КВ. Они сложены несколькими разновид-

ностями: маритовыми, магнетит-маритовыми, гётит-гематит-маритовыми и развиты обычно по тонкополосчатым богатым железом джеспилитам и кварцитам, в которых силикаты отсутствуют или есть в незначительных количествах. Площадная КВ на джеспилитах распространена повсеместно, её мощность до 60 м. Мощность линейных кор на порядок выше и нижние части профилей КВ формировались в более ранние эпохи вплоть до рифейской. В профиле выветривания выделяются четыре зоны (снизу вверх): 1 – начальных; 2 – промежуточных (полуокисленных кварцитов); 3 – устойчивых продуктов выветривания (окисленных кварцитов); 4 – конечных продуктов выветривания (бурых железняков).

Минералы железа представлены магнетит-мартиновой, магнетит-мартит-гётит-гидрогётитовой, мартит-гётит-гидрогётитовой, гематит-гётит-гидрогётитовой ассоциациями. Самая верхняя часть коры (бурожелезная) сложена гидроокислами железа. Объектом основной добычи железа Криворожья служат железистые кварциты, а богатые железные руды составляют всего 1.8 % от общих запасов.

В пределах Криворожского бассейна развит саксаганский тип богатых железных руд (рис. 19), интенсивно измененных (окисленных и выщелоченных) в условиях глубинных зон окисления [74]. Они представлены маритовыми, магнетит-маритовыми, гётит-гематит-маритовыми разновидностями и развиты обычно по тонкополосчатым богатым железом джеспилитам и кварцитам, в которых силикаты отсутствуют или содержатся в незначительных количествах. В Саксаганском районе эти руды достигают глубин 2500 м от поверхности, в Кременчугском – более 1500 м, в Первомайском – более 1200 м. Выделяются: 1 – пластовые и пластообразные залежи шарнирного типа, приуроченные к замку Саксаганской синклинали; 2 – столбо- и гнездообразные залежи, приуроченные к плавным поперечным изгибам крутопадающих пластов железистых пород.

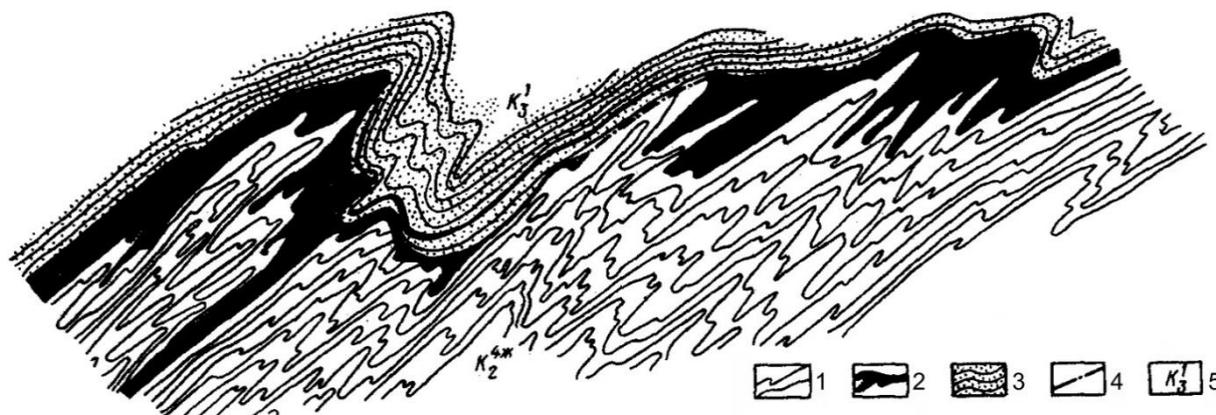


Рис. 19. Структурная позиция залежей ингулецкого типа оруденения в Восточно-Ингулецкой синклинали (рудоуправление им. Ильича, план горизонта 90 м): 1 – железистые кварциты маритовые саксаганской свиты, 2 – богатые руды маритовые, 3 – сланцы гданцевской свиты, 4 – стратиграфические контакты, 5 – стратиграфический индекс. Из работы [37].

[Fig. 19. Structural position of the Ingulets type of mineralization in the East Ingulets syncline (Ilyich mining department, horizon plan 90 m): (1) – martite ferruginous quartzites of the Saksagan Formation, (2) – high-grade martite ores, (3) – shales of the Gndtsevskaya Formation, (4) – stratigraphic contacts, (5) – stratigraphic index. According to the study [37].]

На *Африканском континенте*, в ЮАР известны месторождения из КВ на железистых кварцитах группы Трансвааль, в том числе Табазимбе, северо-западный Трансвааль; Зишен (Mn-Fe) и железорудного поля Постмасбург в Северной Капской провинции. Они приурочены к нижнемеловой поверхности выравнивания. Железо присутствует преимущественно в форме гематита, качество руд высокое (66–69 % Fe₂O₃) с очень малым содержанием вредных примесей. Гематит мелкокристаллический синей окраски на поверхностях излома, иногда с включениями красных гидрокислов железа. Мощность рудных тел 17–60 м, залежание их приповерхностное, запасы в сотни миллионов тонн с большими перспективами их наращивания. На месторождении Зишен Fe-содержащие тела по простиранию переходят в Mn-содержащие.

В *Намибии*, к юго-востоку от Виндхука, имеется серия месторождений поля Каоковельд, которое продолжается в Анголу. На отдельных участках мощности КВ с богатыми железными рудами (свыше 40 % железа) более 50 м и запасы в сотни миллионов тонн. В юго-восточной части поля находится месторождение Каус-Окава-Гагарус. В нем содержание железа меняется от 58 до 59 %, а кремнезема 18 %. Руды сложены гематитом, лимонитом, магнетитом и доступны для разработки открытым способом. Коррелятные КВ осадочные месторождения оолитовых железных руд мелового возраста имеются в Северной Африке [75] и в республике Конго, Западная Африка [76].

В латеритных покровах *эоцен-четвертичного* возраста, с Fe >15 %, сосредоточены его громадные запасы во многие триллионы тонн. Но наибольшие количества Fe приурочены к мощным КВ на джеспилитах и гипербазилах в странах с тропическим климатом (Австралия, Бразилия, Индия, страны Африки и другие), где разрабатываются крупные месторождения БЖР. Эти страны являются основными поставщиками

железа на мировой рынок, составляя сильную конкуренцию России. Большие запасы оолитовых железных руд сосредоточены в Западно-Сибирском железорудном бассейне и на севере Казахстана.

Австралия, как показано выше, располагает самыми крупными в Мире разведанными запасами железных руд, и является её ведущим производителем (37 % мирового производства) и экспортёром. К 2024 году предполагается добыть один триллион тонн. Крупнейшие месторождения железной руды — Айрон-Монарк, Айрон-Ноб, Хамерсли, Маунт-Голдсуэрти, Маунт-Том-Прайс, Маунт-Нырмен, Кокату и другие [77]. Самые богатые железорудные районы страны — Хамерсли, Норт Пилбара и Кимберли – находятся на западе Австралии. Именно там добывается и производится 99 % австралийского железорудного сырья. Остальное (1 %) добывают в штатах Южная Австралия и Тасмания. Большинство Fe-рудников, многие, из которых являются крупнейшими в Мире, сосредоточены в Западной Австралии. Руды всех месторождений разрабатываются открытым способом и не обогащаются, поскольку содержание железа в них до 65 %. Они представлены КВ мощностью в десятки метров по железистым кварцитам, а по зонам трещиноватости до 100 и более метров. Основной минерал руд – гематит, в меньшей степени развиты гетит и гидрогетит.

В *Южной Америке*, на территории Железного Четырёхугольника рудные залежи в КВ первичных джеспилитов палеопротерозойской супергруппы Минас представляют прерывистые линзы разных размеров и формы среди итабиритов. Мощность руд до 100 и более метров (рис. 20). Различают руды богатые гематитовые с > 64 % Fe и промежуточные, с 52–64 % Fe. Последние – рыхлые и обычно переходят в твердые итабириты с малым содержанием Fe. В верхних частях разреза КВ обычна «канга» (67 % Fe) – пизолитовая и бобовая руды, состоящие из обломков твердой или мягкой руды.



Рис. 20. Карьер, где отработываются богатые железные руды района Каражас, штат Пара (Pará), Бразилия. Фото Tony Morrison/South American Pictures [78].

[Fig. 20. A quarry where high-grade iron ores are mined in the Carajas region, Pará state, Brazil. Photo by Tony Morrison/South American Pictures [78].]

Месторождения богатых железных руд известны, главным образом, в штатах Минас-Жераис, Мату-Гросу, Гояс, Байя, на федеральной территории Амапа. Наибольшее количество месторождений находится в центральной части штата Минас-Жераис, где протяженность выходов железорудной формации составляет не менее 200 км, а ресурсы железа оценивают не менее 35 млрд т. В муниципалитетах Итабира, Санта-Барбара, Риу-Пирасикаба, Ору-Прента, Мариана, Казта, Итабириту и других разведаны многие месторождения с запасами богатых железных руд, содержащих 63–69 % и более железа в десятки и сотни миллионов тонн [79 и ссылки в ней].

Известен ряд богатых железорудных объектов в разрезах КВ по итабиритам в Венесуэле. В штате Боливар находится крупное месторождение Эль-Пао. Оно расположено на четырёх холмах пирамидальной формы, сложенных темно-синей гематитовой рудой со средним содержанием железа 68 % и запасами свыше 100 млн т. Месторождение Ла-Репресалия похоже на Эль-Пао, но меньше. Самое крупное месторождение этого типа (600 млн т) Серро-Боливар возвышается над саванной на 600 м. В области Санта-Барбара, расположенной в 20 км восточней и юго-восточней Серро-Боливар, находятся месторождения Сан-Исидро, Сан-Хаокин, Пунта-Серро, Лас-Пейлас, Агуа-Каленте с запасами богатых руд более 200 млн т. По строению и генезису руд они сходны с месторождением Серро-Боливар.

Наиболее крупными латеритными месторождениями в Суринаме являются Дондрубари с запасами в первые сотни миллионов тонн и средними содержаниями 47 % Fe; Миндринети (40 % Fe), Мажородам (50 % Fe) с общими запасами в сотни миллионов тонн. Содержания в рудах прочих компонентов (%): Al_2O_3 до 15; SiO_2 – 2–10; TiO_2 – 0.5–1.5; S – от следов до 0.5; P – от следов до 0.1.

На *Африканском континенте*, в Гвинее, общие ресурсы железных руд страны оценивают в 15.6 млрд т. Содержания железа составляют 40–70 %. Ресурсы, которые уже исследованы в различной степени, достигают 4.46 млрд т. Помимо крупного месторождения Калум в КВ ультраосновных и основных пород известны объекты в пределах областей развития выветрелых джеспилитов нижнего протерозоя. Самые крупные их залежи открыты в горном хребте Симанду и на горе Нимба на юго-восток Гвинеи.

На месторождении Калум залежи представлены латеритной КВ мощностью от 3–5 м до 100 м, развитой по ультрабазитам и базитам (габбро) одноименного массива. В пределах КВ имеется собственно железорудный горизонт мощностью 30–40 м. Ресурсы объекта определены в 6 млрд т со средними содержаниями Fe – 53 %; Al_2O_3 – 9 %; SiO_2 – 1.5 %; Cr – 1.15 %; Ni – 0.12 % [80]. Выделяются типы железной руды (снизу вверх): 1 – желтая мягкая, легкая с реликтивными структурами и текстурами гегитового состава; 2 – плотная красная или коричневая; 3 – твердая черная или очень темная красновато-коричневая гранулированная, с кварцами, гематитовая. По содержанию Fe_2O_3 (73.5 %)

и Al_2O_3 (9.2 %) эти типы близки между собой. На СВ окраине массива выявлена площадь (около 2.6 км²) с содержанием Ni 0.5–0.9 % [81]. Средняя мощность легированных БЖР этого уникального месторождения 10–12 м, а прогнозные запасы – 6 млрд т [82].

На юго-востоке Гвинеи в субмеридиональном горном хребте Симанду протяженностью 200 км при ширине 30–50 км разведаны месторождения БЖР (60–66 % Fe) Северный Симанду, Зогота, Пик-де-Фон. Они приурочены к латеритам кайнозойской КВ мощностью до 150–300 м на итабиритах нижнего протерозоя, залегающих в синклиальных зонах среди архейских гнейсов. БЖР образуют плащеобразные залежи. По данным работы [83], они имеют вертикальную зональность: первичные магнетитовые итабириты – мартитизированные итабириты – кварц-мартитовая рыхлая руда – мартитовая и мартит-лимонитовая рыхлые руды – гётит-гематитовая рыхло-крепкая руда – делювиальная лимонитовая руда (канга и кираса). В этой же работе показано, что во всех типах богатых руд преобладает гематит (60–82 мас. %), его дополняют гидроксиды железа (31–14.5 %), кварц 1–2 %, каолинит 1–3.5 %, гиббсит 1–3.5 %. При выветривании межрудных сланцев образуются одновозрастные с БЖР бокситы и каолины.

В *Индии* имеются крупные запасы богатых железных руд, особенно гематитовых в КВ джеспилитов палеопротерозоя [84]. Известны они и в элювии на базальтах и гипербазитах этой обширной страны. Месторождения расположены в пределах, так называемых железных поясов (рис. 21). В Бенгалии, пояс Одиша Джакханд, источниками руд являлись латериты на юрских траппах. Содержания железа в них колеблются от 28 до 59 % и в среднем составляют 43 %.

Южнее, в штате Орисса (пояс Одиша Джакханд) на железистых полосчатых кварцитах, образующих в рельефе серию гряд, в верхних частях развиты богатые гематитовые руды значительной мощности (рис. 22). Выделяются залежи с рудами массивными, тонкослоистыми, глинистыми, порошковатыми и конгломератовыми. Массивные разности темно-бурые до серо-стальных, с глинистым материалом, несколько беднее железом, содержание которого варьирует между 55 и 60 %. Глинистые руды имеют структуру глинистых сланцев, шелковый или атласный блеск, изменчивый химический состав.

Некоторые из них богаты железом, как и массивные разности, другие содержат менее 50 % Fe. Порошковатые руды образуют узлы и линзы, имеют реликтовую тонкослоистую текстуру, сине-черный цвет, содержат значительное количество железной слюдки, имеющей зеркальный блеск, при прикосновении рассыпаются в порошок. Конгломератовые руды слагают кирасу, состоят из гравийных, конгломератовых, брекччевидных разностей, сцементированы оксидами. Запасы этого местонахождения, находящегося в 275 км от г. Калькутты – около 5 млрд т. Железа в руде – от 60 до 66 %. Содержание в породе кремнезема – не выше 1.0–3.0 %, глинозема – от 2 до 5 %.

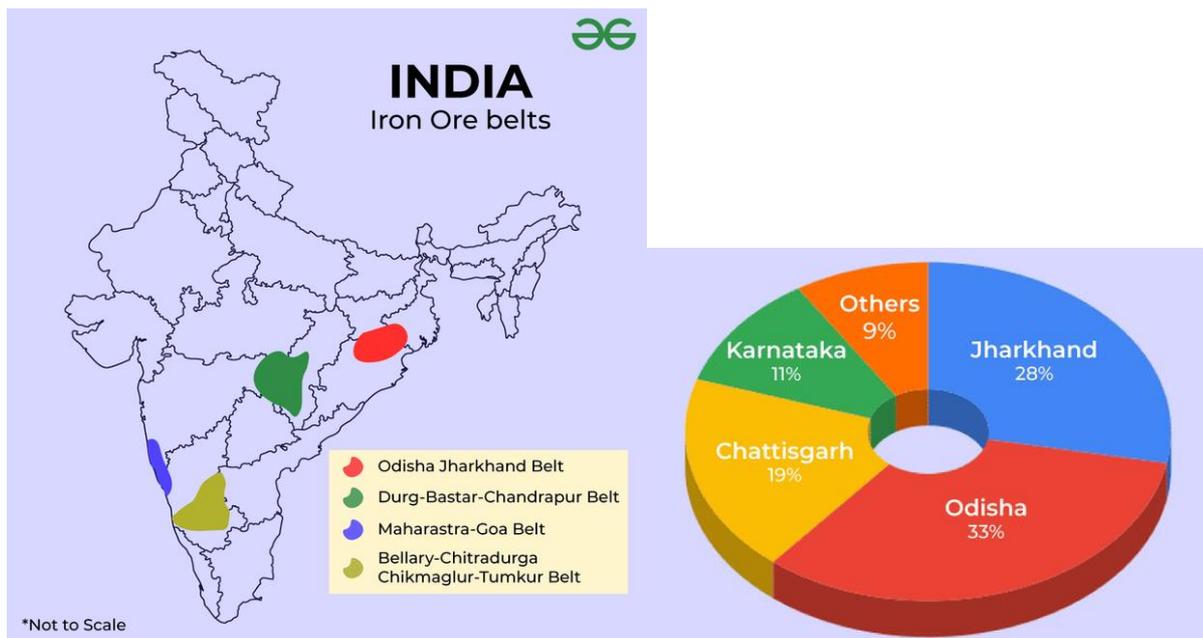


Рис. 21. Железорудные пояса Индии и распределение запасов металла в них. Из работы [85].
[Fig. 21. Iron ore belts of India and distribution of metal reserves in them. According to the study [85].]



Рис. 22. Карьер железорудного месторождения на КВ гряды джеспилитов, возвышающейся над окружающей местностью. Из работы [86].
[Fig. 22. An iron ore deposit quarry on the WC ridge of jaspilites rising above the surrounding area. According to the study [86].]

В центральных частях субконтинента (железорудный пояс Дург Бастар Чандрапур) в горах Байладил имеется 14 месторождений. Они приурочены к верхним частям двух параллельных гряд меридионального простираения. Мощность богатых железных руд 60 м, запасы – сотни миллионов тонн. Шесть подобных месторождений известны в районе Нарайнпур, Бастар, где богатые железные руды слагают вершины гряд. Руды высокого качества. Содержание железа 66–68.5 %, запасы свыше

миллиарда тонн. В западной части округа Дург такие месторождения приурочены к хребтам Дхали и Раджхара, которые протягиваются на 30–35 км зигзагообразной, но непрерывной линией, возвышаясь на 120 м над окружающей местностью. Руды встречаются и в толще полосчатых гематитовых яшм, которые в верхних частях переходят в богатые разности. Содержание железа 66–69 %, запасы сотни миллионов тонн. Подобные месторождения имеются в двух других железорудных поясах.

Легированные железные руды развиты на гипер-базитах островных дуг. На *Филиппинах* они имеются в провинции Суригао на восточном побережье острова Миндано. Мощность руд до 30, в среднем 6 м. Подобные месторождения распространены на Гавайях, где в латеритных легированных железных рудах содержание Fe_2O_3 до 63.8 %, NiO – 1.7 %.

На *Кубе* руды железа также развиты в КВ по гипер-базитам и представляют комплексные Co-Ni-Al-Fe образования, где на месторождении Пинарес-де-Маяри оксида Co 0.04, Ni – 0.54, Al – 13.14, Fe – 63.99 % [87]. В пределах месторождений группы Никаро, приуроченных к латеритным КВ серпентинизированных пород, Fe и Al ниже, а Co и Ni выше. Громадные запасы железа (среднее содержание более 15 %) сосредоточено в кирасе тропических стран.

В меньшей степени, чем железные руды КВ на суше, в кайнозое были распространены оолитовые разновидности лагунно-морского типа, сменявшие перья по простирацию.

Западно-Сибирский бассейн с оолитовыми рудами лотарингского типа мел-палеогенового возраста является одной из крупнейших железорудной провинций Мира. Площадь бассейна около 260 тыс кв². Располагается преимущественно в Томской области. Общие прогнозные ресурсы руд с содержанием железа более 30 %, по разным оценкам составляет от 400 до 900 млрд тонн.

Меловая-палеогеновая трансгрессия, охватившая север Сибирской платформы и всю Западно-Сибирскую плиту (на последней с раннего мезозоя уже установился платформенный тектонический режим), оставила огромные скопления (около 400 млрд т) морских сидерит-гидрогетит-лептохлоритовых руд (рис. 23). Из четырех железорудных уровней три (нарымский, колпашевский, чигоринский) верхнемеловые, а самый верхний – бакчарский, эоценовый. Его проявления образуют полосу протяженностью более 600 км при ширине 50–180 км. Промышленно значимые руды установлены в приобском Бакчарском районе Томской области (150–200 км западней Томска). Здесь железорудные залежи колпашевского и бакчарского горизонтов не только достигают максимальных значений, но и практически объединяются. Объединенное рудное тело имеет мощность 26–36 м, а среднюю – 34 м. Известны четыре участка (Бакчар, Могочино, Колпашево, Парбиг), где в руды содержат более 30 % железа на мощность более двух метров.

Перекрывающая осадочная толща (195 м) содержит пласты бурых углей и лигнитов (4–9 м), торфа (3.5 м), которые тоже могут быть использованы при комплексной отработке Бакчарского месторождения. В работе [89] по структурным особенностям, химическому и минеральному составу руды месторождения подразделяются на шесть типов: 1) плотные гетито-гидрогетитовые руды с сидеритовым цементом; 2) рыхлые гетито-гидрогетитовые; 3) лептохлоритовые с хлоритосидеритовым цементом; 4) конгломератовидные лептохлоритовые с крупными оолитами; 5) сидеритовые; 6) глауконитовые руды с сидеритовым цементом.

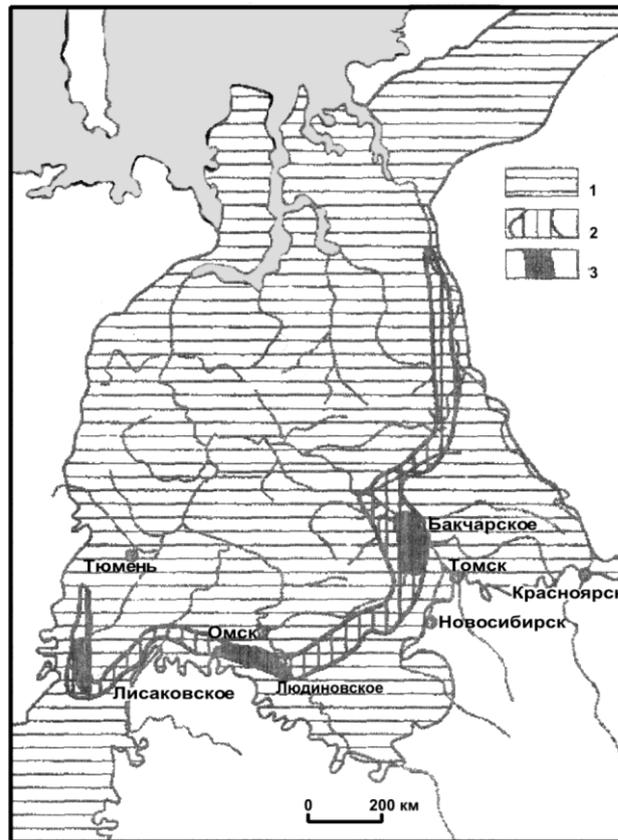


Рис. 23. Распространение мел-палеогенового моря в пределах Сибирско-Казахстанской инфраплатформы и положение в ее пределах прибрежно-морских железорудных отложений. 1 – площадь мел-палеогенового моря; 2 – прибрежно-морские железорудные отложения; 3 – основные железорудные узлы и месторождения. Из работы [88].

[Fig. 23. Distribution of the Cretaceous-Paleogene Sea within the Siberian-Kazakhstan infraplatform and the position of coastal-marine iron ore deposits within it. (1) – area of the Cretaceous-Paleogene sea; (2) – coastal-marine iron ore deposits; (3) – main iron ore sites and deposits. According to the study [88].]

Наиболее распространенные – слабо сцементированные гидрогетитовые с базальным лептохлоритовым цементом (41.5 %) и слабо сцементированные гидрогетит-лептохлоритовые с лептохлоритовым корковым поровым или базальным цементом (30.3 %) [88].

На основе геологической характеристики, физико-механических свойств, структурно-текстурных особенностей, минерального и химического состава на Бакчарском рудопоявлении авторами работы [90] выделяется три природных типа руд: первый – сыпучие оолитовые гидрогетитовые руды; второй – слабо и средне сцементированные гидрогетит-хлоритовые руды; третий – крепко сцементированные гидрогетитовые руды. Выделенные природные типы без труда могут идентифицироваться в ходе полевых работ.

Руды включают аутигенные концентрически-зональные рудные ооиды, оолиты, пеллеты, онколиты, терригенные обломки кварца, иллит, диагенетические сидерит и глауконит (рис. 24). Цвет минералов, слагающих аутигенные образования, коричневатый-черный,

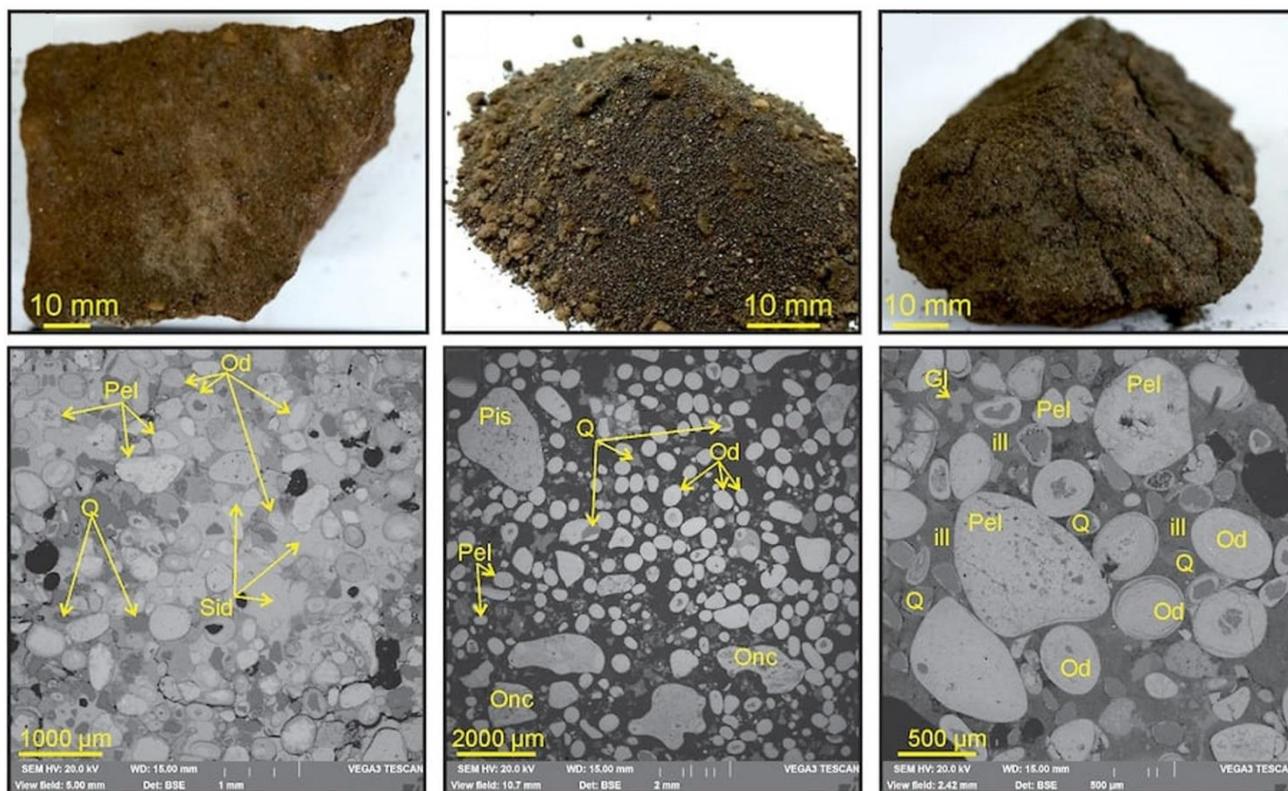


Рис. 24. Фотографии образцов оолитовой железной руды Бакcharского месторождения с их электронными снимками. Условные обозначения: Pel – пеллеты, Od – ооиды, Onc – онколиты, Gl – глауконит, Sid – сидерит, Q – кварц. Из работы [91].
[Fig. 24.] Photographs of samples of oolitic iron ore from the Bakchar deposit with their electronic images. Legend: Pel – pellets, Od – ooids, Onc – oncolites, Gl – glauconite, Sid – siderite, Q – quartz. According to the study [91].]

коричневато-бурый. «Затравками» в концентрически-зональных зёрнах, слагающих ядро оолитов, служат сгустки глинистых минералов, кварц, глауконит, гетит, гидрогетит, лептохлорит, редко магнетит [90].

Содержания железа в залежах – 30–53 %, в среднем 40.16 %. Присутствуют фосфор (P_2O_5 – 1.03–1.3 %), ванадий – 0.13–0.25 %, а также иногда золото (0.65–1.8 г/т), платину (10–127 мг/т), палладий (1.3–16 мг/т). Примесь драгоценных металлов объясняют их сорбированием тонкодисперсным железистым веществом из подземных вод. По этой причине Бакcharские железные руды считают перспективным сырьем и на драгметаллы [92].

Казахстан. Лисаковское месторождение в Костанайской области, на севере республики (Тургайский прогиб) в ряде отечественных публикаций называют меловым. Несомненно, меловые коры выветривания региона внесли в его формирования свой вклад, однако породы лисаковской железорудной формации и оолитовые сидерит-лептохлорит-гидрогетитовые залежи имеют среднеолигоценный возраст. Рудные тела прослежены по простиранию на десятки км. Разведанные запасы руд 2.8 млрд т при содержаниях 35 % Fe [93]. Всего известно 26 пластовых рудных тел мощностью от 6 м до 26 м при общей протяженности до 100 км при ширине 2–8 км.

Пласты руд приурочены к погребенной палеодолине широтного простирания. Они представлены

галечниками, гравием, разнозернистыми, крупно-, средне- и мелкозернистыми кварцевыми песками с железистыми оолитами или лишенными их, алевролитами, песчанистыми глинами, а также выими гидрогетито-сидерито-хлоритовыми оолитовыми рудами [94].

Различают руды оолитовые и цементированные с одинаковым химическим составом. Цементированные руды представлены гидрогетитовыми конкрециями с зёрнами кварца. «В оолитовых рудах присутствует 20–50 % цементированных разностей, распределенных закономерно. Раздельно их не добывают. «Руды содержат 35–40 % Fe, в среднем 0.03 % S, 0.55 % P и около 0.07 % V. Пустая порода в основном представлена кремнеземом и глиноземом. Содержание Fe в оолитах характеризуется постоянством и составляет 51.3–52.9 %, а P – 1.28–1.42 %. Руды пылеватые и содержат большое количество влаги (около 12 %), требуют сложных методов обогащения» [95].

На юго-востоке Мугоджар есть и другие подобные аккумуляции – Кумсайское, Талдыкское, Кировское. Залежи локализованы в пределах погребенных палеодолин и озерных депрессий. Прослой и линзы ожелезненных псаммитов и оолитовых руд содержат прослой алевролитов и глин. Закисные руды находятся в нижней части разреза, они сидерит-лептохлоритовые, окисные – гидрогетитовые. Мощности рудного пласта месторождений 1–12 м, вскрыши – до 15 м. Содержание железа в бурых железняках 24–53 % до 69 %.

Еще один перспективный железорудный бассейн находится на границе Костанайской и Челябинской областей – Аятский. Его ресурсы среднеолигоценовых оолитовых бурых железняков составляют около 10 млрд т, площадь – 2500 км². Мощность рудного тела находится между 2 м и 5 м, иногда достигает 9 м, вскрыши меняется от 0 до 80 м, в среднем по бассейну – 30 м. Среднее содержание железа 37.1 %, серы 0.35–0.36 %, фосфора 0.37–0.40 %, кремнезема 16.0 %. Интересным районом с залежами кайнозойских экзогенных железных руд на площади 150 км² является Керченский. Здесь в подошве выражен ряд пологих мульд (рис. 25), площадью до 30 км² каждая [3].

Морские (лагунные) железорудные залежи в центре мульд имеют мощность до 25–30 метров, иногда до 40, а на крыльях – 2–3 метра. Они принадлежат к средней части киммерийского регионаруса нижнего плиоцена. Окисленные оолитовые гидрогетитовые руды коричневые. Свежие их разновидности гидрогетит-сидерит-хлоритовые, зеленые. Оолиты из гидроксидов железа цементированы карбонатами железа, марганца, баритом, фосфатами. Средние руды содержат (%): железа – 30–35 (до 50), марганца – 0.1–10, пятиоксида фосфора – до 1.5 %. В основании известны прослои сидерита и марганцевых минералов (до 35 % Mn).

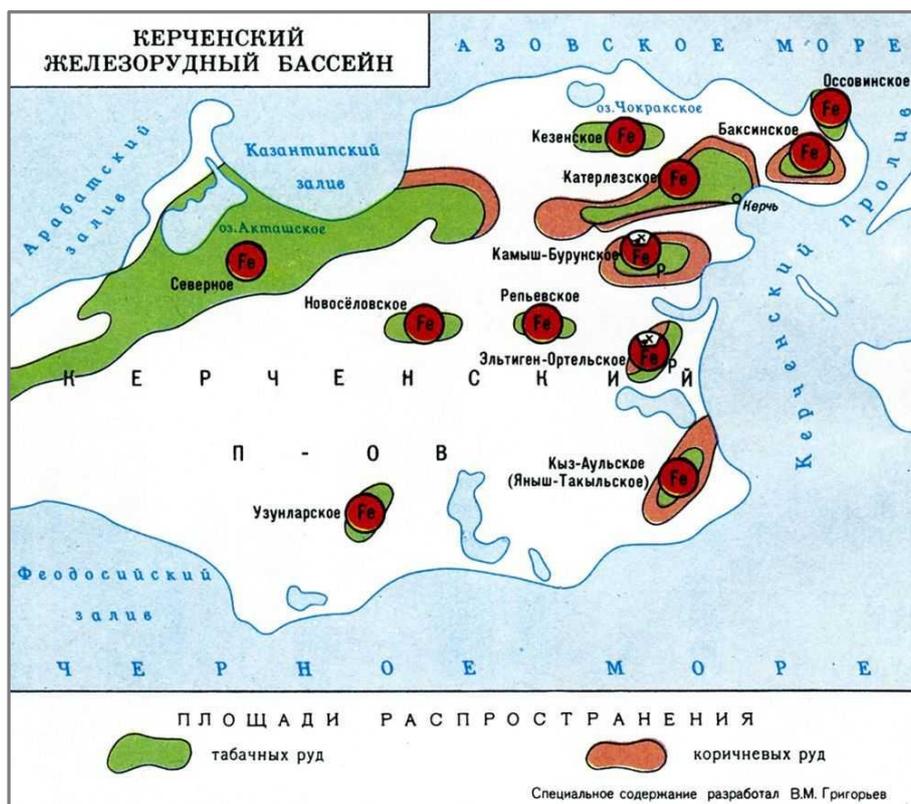


Рис. 25. Месторождения Керченского железорудного бассейна на востоке Крыма тяготеют к многочисленным частным мульдам, выполненным морскими (лагунными) залежами. Последние принадлежат к средней части киммерийского регионаруса нижнего плиоцена [96].

[Fig. 25. The deposits of the Kerch iron ore basin in the east of Crimea tend to be found in numerous troughs formed by marine (lagoonal) deposits. The latter belong to the middle part of the Cimmerian regional stage of the Lower Pliocene [96].]

Заключение

В настоящее время большинство исследователей связывает начало образования железных руд с появлением и развитием органической жизни в мелководноморских бассейнах. Она была представлена в виде цианобактерий и архей. В неорхее среди первых появились фотосинтезирующие виды, продуцировавшие кислород. Последний связывал двухвалентное железо, находящееся в растворимом состоянии, переводя его в трехвалентное, которое в виде оксида выпадало в осадок. Это привело к образованию толщ джеспилитов.

Окисление железа реакция экзотермическая, способствующая ускорению развития органической

жизни и оксигинации атмосферы. Первые бактерии были прокариотами, использующими энергию брожения, затем появились эукариоты, перешедшие на кислородное дыхание. Микроорганизмы использовали железо, растворенное в водных бассейнах, в качестве источника энергии для роста и размножения [11 и ссылки в ней].

Деятельность цианобионтов способствовала накоплению O₂ не только в водных бассейнах, но и в атмосфере. Увеличение в ней этого газа привело к Великому кислородному событию (2.47 млрд лет). Увеличение количества O₂ в атмосфере явилось причиной перевода железа из подвижной двухвалентной формы

в неподвижную трехвалентную, и оно не могло транспортироваться из КВ в морские бассейны. Следствием было практическое исчезновение джеспилитов в позднем палео- и мезопротерозое. Развитие жизни привело примерно 800 млн лет тому назад к появлению многоклеточных организмов и разделению органического мира на три ветви растительную, животную и грибов. В неопротерозое содержание кислорода достигло 15 % [97, 98]. В результате воды мирового океана были насыщены этим газом. В фанерозое сформировалась мощная биосфера. Она охватывала почти всю поверхность планеты, за исключением её приполярных частей. Начиная с девона, возможно и ранее, в приморских участках растительность и животный мир начали осваивать сушу. На ней самые древние обнаруженные остатки – водоросли и грибы имеют возраст 480–460 млн лет [100]. Но несомненен громадный вклад бактерий в преобразование минерального вещества, особенно в формирование КВ, где нередко отмечаются ископаемые биоморфозы этих представителей органического мира. В целом же, в фанерозое по сравнению с докембрием скорость эволюции гипергенных процессов возросла на порядок [101]. Это привело к наращиванию объемов руд железа, среди которых преобладают элювиальные и полифациальные оолитовые.

Таким образом, в докембрийской истории Земли было три ярко выраженных этапа формирования джеспилитов – неоархейский, палеопротерозойский и неопротерозойский. Они отличались друг от друга по условиям образования железных руд. В первый этап формирование месторождений железа происходило преимущественно в пределах зеленокаменных поясов. Оно поступало из эндогенных источников, а его руды залегают в эффузивно-осадочных толщах. Общие запасы руд неоархейского возраста составляют первые десятки миллиардов тонн.

В палеопротерозойский (раннекарельский) этап образование железорудных месторождений было на территории протоплатформ суперконтинента Кенорленд за счет железа, поступавшего из КВ в источниках сноса. В анаэробных условиях на поверхности суши растворимое Fe^{+2} переносилось в морские бассейны. Там оно при воздействии O_2 , генерируемого цианобактериями, переводилось в Fe^{+3} и осаждалось на дно в виде его оксида. Так сформировались самые масштабные в Мире месторождения металла с запасами в сотни миллиардов тонн, известные на всех континентах.

После Великого окислительного события формирование полосчатых железистых кварцитов (BIF формация) прекратилось. Оно возобновилось после более миллиарда лет в специфических условиях ледникового климата с формированием специфических руд в тиллитах. В конце эона, в криогении, в условиях резкого похолодания и чередования оледенений и межледниковий, существовали глубокие рифтовые бассейны, образованные при распаде суперконтинента Родинии. Их воды из-за разложения органики были заражены сероводородом [99]. В них Fe^{+3} переходил в Fe^{+2} . В межледниковые эпохи связь рифтовых бассейнов с Мировым

океаном восстанавливалась. Его воды приносили кислород, который окислял железо, переводя его в осадок. В нем имеются включения эрратического материала, поступавшего из тающих плавучих льдов. К этому этапу относят огромные скопления джеспилитов Эль Мутун, Боливия с запасами 40 млрд т руды. Общие запасы железа этой эпохи с основным минералом гематитом первые сотни миллиардов тонн.

В фанерозое, в отличие от докембрия с его накоплением железа в отдаленных частях палеоводоемов, оно смещается в прибрежно-морские зоны и на сушу. В морях образуются оолитовые руды лотарингского типа, сложенные гидрогетитом шамозитом, сидеритом и гидрогематитом. На суше железо накапливается в породах ФКВ в виде гематита (мартита, спекулярита, железной слюдки), гидрогематита, гетита, гидрогетита сидерита, магнетита.

Анализ распределения запасов железа в фанерозое показал (см. рис. 1), что его накопление происходило в эпохи выравнивания территорий и теплого гумидного климата, интенсивного корообразования на суше и ослабленного приноса терригенного вещества в морские бассейны. Такие условия были в раннем силуре (Северная Америка), позднем девоне-раннем карбоне (Восточная Европа), юре (Западная Европа, Австралия), кайнозое (страны с тропическим климатом). Особенно масштабной была последняя эпоха, когда накопилась большая часть разведанных БЖР. Значительны запасы и руд лотарингского типа. Только в Западно-Сибирском железорудном бассейне предполагаемые запасы по разным источникам составляют порядка 400–900 млрд тонн. И тот факт, что во многих случаях промышленность предпочитает докембрийские руды, объясняется возможностью получения из железистых кварцитов дешевых концентратов, содержащих более 60% железа, практически лишённых вредных примесей.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Страхов Н. М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 299 с.
2. Михайлов Б. М., Вировец В. В., Горбачев Б. Ф. Основные черты экзогенной минерагении СССР // *Металлогения и рудные месторождения. 27-й Международный геологический конгресс СССР*. М.: Наука, 1984. С. 84–94.
3. Дымкин А. М., Чайка В. М. Эволюция накопления природных соединений семейства железа. М.: Наука, 1992. 256 с.
4. Фролов В. Т. Литология. Кн. 2. М.: Изд-во МГУ, 1993. 432 с.; кн. 3. М.: Изд-во МГУ, 1995. 352 с.
5. Старостин В. И. Металлогения: учеб. 2-е изд. испр. и доп. М.: КДУ, 2012. 560 с.
6. Холодов В. Н. Геохимия осадочного процесса. Труды Геологического института. Вып. 574. М.: ГЕОС, 2006. 608 с.
7. Савко А. Д. Эволюция геологических процессов и внешних геосфер в истории Земли / Труды научно-исследовательского института геологии Воронежского гос. ун-та. Вып. 50. 2008. 172 с.
8. Савко А. Д., Шевырев Л. Т. Особенности эволюции экзогенного минерагенеза в раннем докембрии // *Ученые*

- записки Казанского ун-та. Т. 153. кн. 4. Естественные науки. 2011. С. 70–96.
9. Савко А. Д., Шевырев Л. Т. Железисто-кремнистые формации (ЖКФ) континентов – новые историко-минерогенические данные о распространении, возрасте, генезисе. Статья 1. 1. Осадочные бассейны с ЖКФ // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2017. № 3. С. 5–41.
 10. Савко К. А., Базиков Н. С., Артеменко Г. В. Геохимическая эволюция железисто-кремнистых формаций Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии: Источники вещества и геохронологические ограничения // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2015. Т. 23. № 5. С. 3–21.
 11. Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Гладкочуб Д. В., Горячев Н. А., Дервянко А. П., Диденко А. Н., Донская Т. В., Кравчинский В. А., Оганов А. В., Писаревский С. А. Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обитателя человечества. Отв. ред. М. И. Кузьмин, В. В. Ярмолюк. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2021. 327 с.
 12. Зинчук Н. Н., Савко А. Д., Шевырев Л. Т. Историческая минерогения в 3-х томах. Том 1. Введение в историческую минерогению. Воронеж: ВГУ. 2005. 590 с. Том 2. Историческая минерогения древних платформ. Воронеж: ВГУ. 2007. 570 с. Том 3. Историческая минерогения подвижных суперпоясов. Воронеж: ВГУ. 2008. 622 с.
 13. Рундквист Д. В., Ткачев А. В., Черкасов С. В., Гатинский С. В., Соболев П. О., Тихотский С. А., Романюк Т. В., Павленкова Н. И., Горшков А. И., Соловьёв А. А., Абрамович И. И., Вревский А. Б., Хильтова В. Я., Вишневская Н. В., Чесалова Е. И., Арбузова Е. Е., Лебедев И. О., Кутузова Н. И. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В 3-х томах. Том 1. Глобальные закономерности размещения. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 390 с.
 14. Савко А. Д. Минерогения кор выветривания. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 95. 2016. 136 с.
 15. Савко А. Д., Бугельский Ю. Ю., Новиков В. М., Слукин А. Д., Шевырев Л. Т. Коры выветривания и связанные с ними полезные ископаемые. Воронеж: Истоки, 2007. 355 с.
 16. Железные руды Мира [Электронный ресурс]. URL: nedradv.ru/nedradv/ru/ratings?rubric=... (Дата обращения 01.03.2023).
 17. Шевырев Л. Т., Савко А. Д. Рудные месторождения России и Мира. Справочник и учеб. пособие. 2-е изд. испр. и доп. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 82. 2014. 402 с.
 18. Западно-Сибирский железорудный бассейн [Электронный ресурс]. URL: ru.wikipedia.org. (Дата обращения 14.03.2023)
 19. Bekker Andrey, Slack John F., Planavsky Noah, Bryan Krapež, Konhauser Axel Kurt, Rouxe Olivier J. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes // *Economic Geology*, May 2010. 105 (3). P. 467–508.
 20. Dardenne M. A., Bizzi L. A., Schobbenhaus C., Vidottie R. M.. Depósitos Minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogenéticas. *Geologia, Tectónica e Recursos Minerais do Brasil, Gonçalves J.H (eds.)*. CPRM, Brasília, 2003. Capítulo VII. P. 359–465.
 21. Tassinari Colombo C. G, Munha M. U., Teixeira W., Palacios. T. A., Nutman Allen P, Sosa Cesar S., Santos Adjair P., and Calado Bruno O. The Imataca Complex, NW Amazonian Craton, Venezuela: Crustal evolution and integration of geochronological and petrological cooling histories episodes Jose // *Episodes, March* 2004. Vol. 27. No. 1. P. 3–13.
 22. Kaouat Iron Ore Project Mauritania. [Электронный ресурс]. URL: www.transafrikaresources.com/.../transafrik... (Дата обращения 01.03.2023).
 23. Zhai Mingguo, Windley Brian F. The Archaean and early Proterozoic banded iron formations of North China: their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth / References and further reading may be available for this article. To view references and further reading you must purchase this article // *Precambrian Research*. 1990. Vol. 48. 1. 3. P. 267–286.
 24. Геология СССР. Т. XVIII: Якутская АССР. Полезные ископаемые. М.: Недра, 1979. 412 с.
 25. Развитие золотодобывающей промышленности и освоение месторождений цветных металлов в Республике Саха (Якутия) в 2007–2009 гг. Ведомственная целевая программа. [minprom-sakha.ru > files/zolotodob.pdf](http://minprom-sakha.ru/files/zolotodob.pdf). (Дата обращения 21.03.2023).
 26. Bark, Glenn. Orogenic gold in the new Lycksele-Storuman ore province, northern Sweden; the Palaeoproterozoic Fäboliden deposit // *Glenn Bark & Pär Weihed. Licentiate Thesis. Luleå University of Technology*, 2005. 25 p.
 27. Sciuba, Marjorie. Mineralogy and Geochemistry of the Banded Iron-Formation in the Svartliden Gold Deposit, Northern Sweden // *Marjorie Sciuba*, 2013. 109 p.
 28. Костомукшское железорудное месторождение [Электронный ресурс]: ru.wikipedia.org (Дата обращения 01.03.2023).
 29. Щеголев И.Н. Железорудные месторождения докембрия и методы их изучения. М.: Недра, 1985. 192 с.
 30. Iron Ore Production by Country 2022 i [Электронный ресурс]: URL: www.statista.com/statistics/267380/iron-ore-mine-production-by-country. (Дата обращения 15.06.2023).
 31. Хамерсли (Hamersley), железорудный бассейн в Австралии, в штате Зап. Австралия. [Электронный ресурс]: URL: old.bigenc.ru/geology/text/4728788 (Дата обращения 01.06.2023).
 32. Beukes N. J., Gutzmer J. Origin and paleoenvironmental significance of major iron formations at the Archean–Paleoproterozoic boundary // *Soc. Econ. Geol. Rev.* 2008. Vol. 15. P. 5–47.
 33. Савко К. А., Самсонов А. В., Холин В. М., Базиков Н. С. Мегаблок Сарматия как осколок суперкратона Ваалбара: корреляция геологических позиций на границе архея и палеопротерозоя // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2017. Т. 25. № 2. С. 3–32
 34. Минерально-сырьевые ресурсы КМА [Электронный ресурс]: URL: textarchive.ru/c-1845210-p2.html. Дата обращения 15.06.2023).
 35. Голивкин Н. И., Кононов Н. Д., Орлов В. П. и др. Железные руды КМА. Гл. ред. В. П. Орлов. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. 616 с.
 36. Белевцев Я. Н., Кулик Д. А., Коржнев М. Н. и др. Железисто-кремнистые формации докембрия. Киев: Наукова думка, 1992. 228 с.
 37. Железная руда Украины – Запасы железных руд [Электронный ресурс]: URL: studwood.net/1639574/geografiya...ruda_ukrainu. Дата обращения 15.07.2023).
 38. Савко А. Д., Додатко А. Д. Коры выветривания в геологической истории Восточно-Европейской платформы. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1991. 232 с.
 39. Ильин А. В. Неопротерозойские железистые кварциты // *Литоология и полезные ископаемые*. 2009. № 1. С. 87–95.
 40. Чумаков Н. М. Оледенения Земли. История, стратиграфическое значение и роль в биосфере. Труды Геологического ин-та РАН. М.: ГЕОС. Вып. 611. 2015. 160 с.
 41. Железистые кварциты: свойства, происхождение, состав породы и основные месторождения [Электронный ресурс]:

- URL <https://fb.ru/article/443623/jelezistyie-kvartcityi-svoystva-proishojdenie-sostav-porodyi-i-osnovnyie-mestorojdeniya?ysclid=lm9942ezoz907258478> (Дата обращения 05.06.2023)
42. El Mutún From Wikipedia, the free encyclopedia Geology of Bolivia – Wikipedia [Электронный ресурс]: URL: the free encyclopedia en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_Bolivia (Дата обращения 01.05.2023).
43. Gaucher Claudio, Alcides L. Sial, Robert Frei Chemostratigraphy of Neoproterozoic Banded Iron Formations (BIF): Types, age, and origin. Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications. Chapter 17. [Mu. Ramkumar, ed.]. *Amsterdam-Oxford-Waltham: Elsevier*. 2015. P. 433–450.
44. Khalil, Isaac. Banded Iron Formations from the Eastern Desert of Egypt: A new type of Ore? / Isaac Khalil and Aley K. El-Shazly // Session 02d (Poster): Precambrian sediments as records of early earth tectonics and oceanatmosphere-biosphere interactions. – Poster # 24. – Banded Iron Formations from the Eastern Desert ... Marshall University [Электронный ресурс]: URL: www.science.marshall.edu/elshazly/Khalil_Elshazly_Goldsch... (Дата обращения 01.07.2023).
45. Macdonald E. F., Smith J. V., Strauss G. M., Cox G. P., Halverson C. F. A. Neoproterozoic and early Paleozoic correlations in the western Ogilvie Mountains, Yukon. *Yukon Exploration and Geology*, 2010 [K.E. MacFarlane, L.H. Weston and C. Relf, eds.]. *Yukon Geological Survey*, 2011. P. 161–182.
46. Pitman, Paul. Technical Report on the CERRO ROJO PROJECT Department de Santa Cruz Provincia German Busch 58° 15' to 58° 21' west, 19° 02' to 19° 06' north BOLIVIA. Paul Pitman, 2011. 102 p.
47. Cornelis Klein and Eduardo A. Ladeir. Geochemistry and mineralogy of neoproterozoic banded iron-formations and some selected, siliceous manganese formations from the Urucum district, Mato Grosso do sul, Brazil // *Economic Geology*. 2004. Vol. 99. P. 1233–1244.
48. Geoffrey J. Baldwin, Thomas F. Näglerb, Nicolas D. Greber, Elizabeth C. Turner, Balz S. Kamber. Mo isotopic composition of the mid-Neoproterozoic ocean: An iron formation perspective // *Precambrian Research*. Vol. 230. 2013. P. 168–178.
49. Arce-Burgoa, Osvaldo R Metallogeny of Bolivia / Osvaldo R. Arce-Burgoa, Richard J. Goldfarb [Электронный ресурс]: URL: www.dim.uchile.cl/~lsaavedr/.../Metallogeny%20of%20Bolivia.pdf (Дата обращения 01.06.2023).
50. Hoffman P.F., Kondon D.J., Bowring S.A. et al. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia // *Geology*. 2004. Vol. 32. P. 817–820.
51. Key R.M., Liyungu A.K., Njamu F.M., Somwe V., Banda J., Mosley P.N., Armstrong R.A. The western arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and its potential for copper mineralization // *J. Afr. Earth Sci.* 2001. Vol. 33. I. 3/4. P. 503–528.
52. Hofmann M., Linnemann U., Hoffmann K.-H., Germs G., Gerdes A., Marko L., Eckelmann K., Gärtner A., Krause R. The four Neoproterozoic glaciations of southern Namibia and their detrital zircon records: The fingerprints of four crustal growth events during two supercontinent cycles // *Precambrian Res.* 2014. Vol. 259. P. 176–188.
53. Dardir A. A. States and futures development of iron and steel industry in Egypt: internal report / Geological Survey and Mineral Authority. Egypt, 1990. 22 p.
54. Preiss W. V., Gostin V. A., Mckirdy D. M., Ashley P. M., Williams G. E., Schmidt Ph. W. The glacial succession of Sturtian age in Soutg Australia: The Yudnamutana Subgroupe. Ed. E. Arnaud, G. P. Halverson, G. Shields-Zhou. // *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. 2011. No. 36. P. 701–712.
55. Barford G. H., Albaredo F., Kroll A. H., et al. New Lu-Hf and Pb-Pb age constraints on the earliest animal fossils // *Earts and Planetary Sci. Letters*. 2002. No. 201. P. 203–212
56. Yin C, Tang F., Lin Y., et al. U-Pb zircon age from the base of the Ediacaran formation, South China: constraint of theage of Marinoan glaciation // *Episodts*. 2005. No. 1. P. 48–49.
57. Третьяков А. А., Дегтярев К. Е, Данукалов Н. К., Каныгина Н. А. Неопротерозойский возраст железорудной вулканогенно-осадочной серии Улугауского террейна (Центральный Казахстан) // *ДАН. Науки о Земле*. 2022. Т. 502. № 2. С. 49–55
58. Архипов Г. И. Железорудные месторождения: Геодинамика, магматизм и металлогения востока России. Кн. 2. Хсабаровск: Изд-во ДВО РАН, 2007. С. 741–747.
59. Sedimentology and Geochemistry of Glaciogenic... [Электронный ресурс]: URL: econgol.geoscienceworld.org.cgi... 542 p. (Дата обращения 01.03.2023).
60. Бергман И. А. О генезисе железисто-кремнистой формации Рапитан позднепротерозойского возраста (Северо-Западная Канада) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 4. С. 15–17.
61. Холодов В. Н., Недоумов Р. Н. Голубовская Р. Е. Фациальные типы осадочных железорудных месторождений и их геохимические особенности. Сообщение 1. Фациальные группы осадочных руд, их литология и генезис // *Литология и полезные ископаемые*. 2012. № 6. С. 503–531.
62. Холодов В. Н., Недоумов Р. Н. Голубовская Р. Е. Фациальные типы осадочных железорудных месторождений и их геохимические особенности. Сообщение 2. Проблемы геохимии фанерозойских осадочных руд // *Литология и полезные ископаемые*. 2013. № 1. С. 17–52.
63. Савко А. Д., Шевырев Л. Т. Историко-минерагенический анализ геологического прошлого континентов. Ст. 2. Каледонский этап // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2009. № 1. С. 5–30.
64. Рудные месторождения США: в 2 т. М.: Мир, 1973. Т. 2. 636 с.
65. Савко А. Д., Никулин И. И., Овчинникова М. Ю., Боева Н. М. Историко-генетический анализ формирования богатых железных руд и связанных с ними бокситов Курской магнитной аномалии // *Литология и полезные ископаемые*. 2022. № 4. С. 334–343.
66. Никулин И. И., Савко А. Д., Меркушова М. Ю. Типы гипергенных богатых железных руд Белгородского района Курской Магнитной Аномалии // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2015. № 3. С. 71–82.
67. Никулин И.И. Геология и генезис месторождений гипергенных железных руд (на примере Курской магнитной аномалии): дисс. ... д-ра геол. мин. наук. М.: МГУ, 2017. 442 с.
68. Меркушова М. Ю., Никулин И. И. Сравнительный анализ богатых железных руд Белгородского и Старооскольского железорудных районов КМА // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2015. № 4. С. 107–113.
69. Меркушова М. Ю., Жегалло Е. А. Биоморфные структуры в богатых железных рудах КМА (по результатам электронно-микроскопического исследования) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 2. С. 150–154.
70. Овчинникова М. Ю. Жегалло А. Е. Ископаемые организмы и следы их жизнедеятельности в бокситах КМА // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019. № 2. С. 141–145.
71. Dill H. G. Sachsenhofer R. F., Greculs P., Sasvari T., Palinkas L. A. Fossil fuels, ore and industrial minerals // *The geology of Central Europe: Mesozoic and Cenozoic, Geological Society of London*. 2008. P. 1341–1371.

72. Эпохи корообразования в истории Воронежской антеклизы. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. 1979. 119 с.
73. Лотарингский железорудный бассейн [Электронный ресурс]: URL: <http://mining-enc.ru/lotaringiskij-zhelezorudnyj-bassejn>. (Дата обращения 01.03.2023).
74. Белевцев Я. Н., Епатко Ю. М., Веригин М. И., Лебедев Ю. С., Малютин Е. И. Железорудные месторождения Украины и их прогнозная оценка. Киев: Наукова Думка, 1981. 232 с.
75. Ramadan T. M., Hassaan M. M., Sultan A. S., El Kelani A. Use of remote sensing air-borne magnetic and geochemical data in the exploration for iron deposits in the Oweinat-El Kharga district, Western desert, Egypt // *Ustralian Journ. Of Basic fnd Applied Sciences*. 2009. Vol. 3(1). P. 254–266.
76. Ojo Olusola J. Sedimentary Facies Relationships and Depositional Environments of the Maastrichtian Enagi Formation, Northern Bida Basin, Nigeria // *Journal of Geography and Geology*. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 136–147.
77. Добыча руд в Австралии: крупнейшие месторождения и экспорт [Электронный ресурс]: URL: <https://i-avstraliya.ru/etnicheskoe-razvitie-avstralii/dobycha-rud-v-avstralii.html?ysclid=lm97r3s16z402035536> (Дата обращения 10.08.2023).
78. Incyclopedia Britannica [Электронный ресурс]: URL: <http://media-3.web.britannica.com/eb-media/86/20286-004-FF39DD42.jpg>. (Дата обращения 10.08.2023).
79. Шевырев Л. Т., Савко А. Д. Рудные месторождения России и Мира. 2-е изд-е. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып. 82. 2014. 402 с.
80. Guinea Economic analysis. The most important [Электронный ресурс]: URL : <http://www.guinea.aha.ru>. (Дата обращения 10.08.2023).
81. Вершинин А. С. Геология, поиски и разведка гипергенных месторождений никаеля. М.: Недра, 1993. 302 с.
82. Лазаренков В. Г., Таловина И. В., Белоглазов И. И., Володин В. И. Платиновые металлы в гипергенных никелевых месторождениях и перспективы их промышленного извлечения. СПб: Недра, 2006. 188 с.
83. Болонин А. В., Мызников И. К., Нигматулина А. М. Богатые железные руды в латеритной коре выветривания полосчатой железистой формации в горном хребте Симанду (Гвинейская Республика) // *Руды и металлы*. 2023. № 2. С. 44–63.
84. Detailed information dossier (DID) on iron ores in India. Geological Survey of India, 1994. Government of India, 2006. 194 p.
85. Железорудные месторождения [Электронный ресурс]: URL: okvsk.ru...chuguna... (Дата обращения 01.06.2023)
86. What are the Major Iron Ore Belts in India? [Электронный ресурс]. www.geeksforgeeks.org/what-are-the-major-iron-ore-belts-in-india. (Дата обращения 26.05.2023).
87. Бугельский Ю. Ю., Васкес О., Григорьева И. И. Рудные месторождения Кубы. М.: Наука, 1985. 242 с.
88. Мазуров А. К., Боярко Г. Ю., Емешев В. Г., Комаров А. В. Перспективы освоения Бакчарского месторождения железных руд, Томская область // *Руды и металлы*. 2006. № 2. С. 4–70.
89. Асочакова Е. М., Коноваленко С. И. Геохимические особенности железных руд Бакчарского месторождения (Западная Сибирь) // *Вестник томского государственного университета. Науки о Земле*. 2007. № 305. С. 219–222.
90. Рудмин М. А., Мазуров А. К., Рубан А. С. Морфология и вещественный состав железных руд Бакчарского рудопроявления (Томская область) // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11–6. С. 1323–1327
91. О генезисе Бакчарского месторождения железа [Электронный ресурс]: URL: kommersant.ru/Наука. (Дата обращения 20.07.2023).
92. Пшеничкин А. Я., Домаренко В. А. Петрографо-геохимические особенности руд Бакчарского месторождения // *Вестник науки Сибири. 1. Науки о Земле*. 2011. № 1. С. 13–18
93. Лисаковское месторождение. Геология металлов [Электронный ресурс]: URL: [votdoklad/ ru>643.html](http://votdoklad.ru/643.html)... (Дата обращения 24.08.2023)
94. Каскатаева К. Б., Кряжева Т. В., Садчиков А. В., Дьяконов В. В. Характеристика руд лисаковского месторождения с целью их комплексной переработки // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. № 5. С. 7–13
95. Месторождения железной руды. Казахстан и Средняя Азия [Электронный ресурс]: URL : [http // posledneeslovo.ru/kazakhstan-i-srednyaya-aziya/](http://posledneeslovo.ru/kazakhstan-i-srednyaya-aziya/) (Дата обращения 26.08.2023)
96. Academic Dictionaries and Encyclopedias [Электронный ресурс]: URL : http://dic.academic.ru/pictures/enc_geolog/1001.jpg. (Дата обращения 26.08.2023)
97. Хейзен Р. История Земли: от звездной пыли к живой планете. Первые 4500 000 000 лет. М.: Династия, 2015. 345 с.
98. Gaucher, Claudio. Chemostratigraphy of Neoproterozoic Banded Iron Formations (BIF): Types, age, and origin / Claudio Gaucher, Alcides L. Sial, Robert Frei // *Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications*. 2015. Vol. 17. P. 433–450.
99. Sedimentology and Geochemistry of Glaciogenic... [Электронный ресурс]: URL: [econgeol. geoscienceworld.Org.cgi...](http://econgeol.geoscienceworld.Org.cgi...) 542.p (Дата обращения 01.03.2023).
100. Webby B. D., Drosel M., Paris F., Percival I. (Ed.). The Great Ordovician Biodiver-sification Event. New York: Columbia Univ. Press, 2004. 484 p.
101. Butterfield N. J. Hooking some stem-group worms: fossil lophotrochozoans in the Burges Shale // *Bioessays*. 2006. Vol. 28. No. 12. P 1161–1166

Evolution of iron accumulation in the history of the Earth©2023 A. D. Savko[✉]*Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl.,
Voronezh, 394018, Russian Federation***Abstract**

Introduction: Features of iron accumulation in the history of the Earth were considered in the studies of N. M. Strakhov (1963), B. M. Mikhailova et al. (1984), V. T. Frolova (1999), V. N. Kholodova (2005), A. D. Savko (2008) and others. At the same time, new data that have appeared in recent years on the large-scale concentration of this metal in supergene, sedimentary, and volcanic-sedimentary deposits, its reserves and resources, the genesis and role of organic matter, allow us to expand our understanding of the evolution of iron accumulation over time, which is the purpose of this article.

Research methods and factual material: The main volumes of accumulated iron ores are concentrated in weathering crusts (WC), sedimentary, volcanogenic-sedimentary and metamorphogenic-sedimentary formations. Therefore, formational, facies, paleogeographic, comparative lithological, and stage methods of studying them were used. The factual material for this article is based on data from the three-volume “Historical Minerageny”, which provides information about more than 5000 significant deposits of various minerals, including several hundred for iron ores. World iron reserves for 2021 from the US Geological Survey (USGS) were used.

Results and discussion: In the Precambrian history of the Earth, there were three distinct stages in the formation of jaspilites: Neoproterozoic (during 2.8–2.5 billion years), Paleoproterozoic (during 2.5–2.3 billion years) and Neoproterozoic (during 720–635 million years). During the first stage, the formation of iron concentrations occurred in the marine basins of greenstone belts. It came from endogenous sources, and its ores occur in effusive-sedimentary strata. The total reserves of ores of this age amount to the first tens of billions of tons. During the Paleoproterozoic (Early Karelian) stage, the formation of iron ore deposits occurred on the territory of the protoplatforms of the Kenorland supercontinent due to iron coming from the WC in the demolition sources. Under anaerobic conditions on the land’s surface, soluble Fe^{+2} were transported to sea basins. There, under the influence of oxygen generated by cyanobionts, it was converted into Fe^{+3} and precipitated to the bottom as iron oxide. This is how the largest metal deposits in the world were formed with reserves of hundreds of billions of tons. After the Great Oxidation Event (2.3 Ga), the formation of banded ferruginous quartzites (BIF formation) ceased as free oxygen appeared in the atmosphere, converting iron into its immobile form in the oxide. It resumed after more than a billion years in a glacial climate with the formation of specific ores in tillites. At the end of the eon, in the Cryogeny, during the alternation of glaciations and interglacials, there were deep anoxic rift basins formed during the collapse of the supercontinent Rodinia. Their waters were contaminated with hydrogen sulphide due to the decomposition of organic matter. In these waters Fe^{+3} converted into Fe^{+2} . During interglacial periods, the connection between the rift basins and the World Ocean was restored. Its waters brought O_2 , which oxidized iron, converting it into sediment. It contained inclusions of erratic material that came from melting floating ice. This stage included the huge accumulations of jaspilites of El Mutun and Bolivia with 40 billion tons of ore. The total reserves of iron of this era with the main mineral hematite were the first hundreds of billions of tons.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Savko Arkady Dmitrievich, e-mail: savko@geol.vsu.ru

In the Phanerozoic, in contrast to the Precambrian with its accumulation of iron in remote parts of paleo-reservoirs, it shifts to coastal-marine zones and onto land. In the seas, and less often in lagoons and lakes, oolitic ores of the Lorraine type are formed, composed of hydrogoethite, chamosite, siderite, and hydrohematite. On land, iron accumulates in WCs rocks in the form of hematite (martite, iron mica), hydrohematite, goethite, hydrogoethite siderite, and magnetite.

The analysis of the distribution of iron reserves in the Phanerozoic showed that its accumulation occurred during the era of levelling of territories and a warm humid climate, intensive crust formation on land and a weakened supply of terrigenous matter to sea basins. Such conditions existed in the Early Silurian (North America), Late Devonian-Early Carboniferous (Eastern Europe), Jurassic (Western Europe, Australia), Cenozoic (countries with tropical and subtropical climates). The last era was especially large-scale, when most of the explored HGIO accumulated in the WCs. The reserves of Lorraine type ores are also significant. According to various sources, in the West Siberian iron ore basin alone they amount to about 400–900 billion tons. The fact that in many cases industry prefers Precambrian ores is explained by the possibility of obtaining cheap concentrates from ferruginous quartzites containing more than 60% iron, practically devoid of harmful impurities.

Conclusions: Iron ores are mostly typical exogenous minerals, formed under the influence of various tectonic, paleogeographic and biochemical factors. The evolution of iron accumulation has a pulsation-directed trend with pronounced epochs of ore formation. In the Archean, iron ore accumulations gravitated towards greenstone belts, in the Paleoproterozoic they gravitated towards protoplatforms, in the Neoproterozoic they gravitated towards rift depressions, and in the Phanerozoic they gravitated towards platforms. Precambrian ores are represented mainly by rocks of the BIF formation, Phanerozoic res are represented mainly by rocks of WCs and oolitic formations. Over time, the mineral and petrographic types of ores also evolved. The Archean and Paleoproterozoic are characterized by hematite-magnetite ores BIF, the Neoproterozoic – hematite GIF, Phanerozoic is characterized by hematite, hydrohematite, goethite, hydrogoethite for WCs and oolitic hematite-chamosite-siderite of the Lorraine type.

Keywords: jespilites, weathering crust formation, oolitic iron ores, iron ore basins, magnetite, hematite, martite, goethite.

For citation: Savko A. D. Evolution of iron accumulation in the history of the Earth // *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2023. No. 3. pp. 4–39. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/4-39>

Conflict of interests: The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Strahov N. M. *Tipy litogeneza i ih jevoljucija v istorii Zemli* [Types of lithogenesis and their evolution in the history of the Earth]. Moscow, Gosgeoltekhizdat publ., 1963, 299 p. (In Russ.)
2. Mihajlov B. M., Virovec V. V., Gorbachev B. F. Osnovnye cherty jevzogennoj mineragenii SSSR [Main features of exogenous mineralogeny of the USSR]. *Metallogenija i rudnye mestorozhdenija. 27-j Mezhdunarodnyj geologicheskij kongress SSSR*. [Metallogeny and ore deposits. 27th International Geological Congress of the USSR] Moscow, Nauka publ., 1984, pp. 84–94 (In Russ.)
3. Dymkin A. M., Chajka V. M. *Jevoljucija nakoplenija prirodnyh soedinenij semejstva zheleza* [Evolution of accumulation of natural compounds of the iron family]. Moscow, Nauka publ., 1992, 256 p. (In Russ.)
4. Frolov V. T. *Litologija* [Lithology]. Kn. 2. Moscow, MGU publ., 1993, 432 p.; kn. 3. Moscow, MGU publ., 1995. 352 p. (In Russ.)
5. Starostin V. I. *Metallogenija* [Metallogeny]. 2 Ed. Moscow, KDU publ., 2012, 560 p. (In Russ.)
6. Holodov V. N. Geohimija osadochnogo processa [Geochemistry of sedimentary process]. *Trudy Geologicheskogo instituta* [Proceedings of the Geological Institute.], Moscow, GEOS publ., vol. 574, 2006, 608 p. (In Russ.)
7. Savko A. D. *Jevoljucija geologicheskikh processov i vneshnih gosfer v istorii Zemli* [Evolution of geologic processes and external geospheres in the Earth's history]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta geologii Geologii* [Proceedings of the Research Institute of Geology of Voronezh State University], Voronezh, VSU publ., vol. 50, 2008, 172 p. (In Russ.)
8. Savko A. D., Shevyrev L. T. Osobennosti jevoljucii jevzogen-nogo minerogeneza v rannem dokembrii [Peculiarities of evolution of exogenous mineralogenesis in the Early Precambrian]. *Uchenye zapiski Kazanskogo un-ta – Scientific Notes of Kazan University*, vol. 153(4), 2011, pp. 70–96 (In Russ.)
9. Savko A. D., Shevyrev L. T. Zhelezisto-kremnistye formacii (ZhKF) kontinentov – novye istoriko-mineragenicheskie dannye o rasprostranenii, vozraste, genezise. Stat'ja 1. 1. Osadochnye bassejny s ZhKF [Iron-siliceous formations (ISF) of the continents - new historical and mineralogenic data on distribution, age, genesis. Article 1. 1. Sedimentary basins with LCF]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 3, pp. 5–41 (In Russ.)
10. Savko K. A., Bazikov N. S., Artemenko G. V. Geohimicheskaja jevoljucija zhelezisto-kremnistyh formacij Voronezhskogo kristallicheskogo massiva v rannem dokembrii: Istochniki veshhestva i geohronologicheskie ogranichenija [Geochemical evolution of ferruginous-siliceous formations of the Voronezh crystalline massif in the Early Precambrian: Sources of matter and geochronologic constraints]. *Stratigrafija. Geologicheskaja korrelyacija – Stratigraphy. Geologic correlation*, 2015, vol. 23, no. 5, pp. 3–21 (In Russ.)
11. Kuz'min M. I., Jarmoljuk V. V., Gladkochub D. V., Gorjachev N. A., Derevjanko A. P., Didenko A. N., Donskaja T. V., Kravchinskij V. A., Oganov A. V., Pisarevskij S. A. Geologicheskaja jevoljucija Zemli: ot kosmicheskoy pyli do obiteli chelovechestva. [Geologic Evolution of the Earth: from Cosmic Dust to the Abode of Mankind]. Ed. M. I. Kuz'min, V. V. Yarmolyuk. Novosibirsk, Academic Publishing House "Geo"publ., 2021, 327 p. (In Russ.)
12. Zinchuk N. N., Savko A. D., Shevyrev L. T. Istoricheskaya mineragenija. [Historical Minerageny]. In 3 Vol. 1. Vvedenie v

- istoricheskuyu minerageniyu. [Introduction to historical minerageny]. Voronezh, VSU publ., 2005, 590 p.; Vol. 2. Istoricheskaya minerageniya drevnikh platform. [Historical Minerageny of Ancient Platforms]. Voronezh, VSU publ., 2007, 570 p. Vol. 3. Istoricheskaya minerageniya podvizhnykh super-poyasov [Historical minerageny of mobile superbelts]. Voronezh, VSU publ., 2008, 622 p. (In Russ.)
13. Rundkvist D. V., Tkachev A. V., Cherkasov S. V., Gatinskij S. V., Sobolev P. O., Tihotskij S. A., Romanjuk T. V., Pavlenkova N. I., Gorshkov A. I., Solov'jov A. A., Abramovich I. I., Vrevskij A. B., Hil'tova V. Ja., Vishnevskaja N. V., Chesalova E. I., Arbutzova E. E., Lebedev I. O., Kutuzova N. I. Krupnye i superkrupnye mestorozhdenija rudnyh poleznyh iskopaemyh [Large and superlarge deposits of ore minerals]. In 3 Vol. 1. Global'nye zakonomernosti razmeshhenija. [Global regularities of location]. Moscow, IREM RAN publ., 2006, 390 p. (In Russ.)
14. Savko A. D. Minerageniya kor vyvetrivaniya [Mineralogy of weathering crusts]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 95, 2016, 136 p. (In Russ.)
15. Savko A. D., Bugel'skij Ju. Ju., Novikov V. M., Slukin A. D., Shevyrev L. T. *Kory vyvetrivaniya i svjazannye s nimi poleznye iskopaemye* [Weathering crusts and associated minerals]. Voronezh, Istoki publ., 2007, 355 p. (In Russ.)
16. Zheleznyye rudy Mira [Iron Ores of the World]: Available at: URL: nedradv.ru/nedradv/ru/ratings?rubric=... (accessed 01.03.2023) (In Russ.)
17. Shevyrev L. T. Savko A. D. Rudnye mestorozhdenija Rossii i Mira [Ore deposits of Russia and the World: textbook, 2 ed.]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 82, 2014, 402 p. (In Russ.)
18. Zapadno-Sibirskij zhelezorudnyj bassejn [Zapadno-Sibirskiy iron ore basin]: Available at: URL: ru.wikipedia.org. (accessed 14.03.2023) (In Russ.)
19. Bekker Andrey, Slack John F., Planavsky Noah, Bryan Krapež, Konhauser Axel Kurt, Rouxe Olivier J. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes. *Economic Geology*, May 2010, 105 (3), pp. 467–508.
20. Dardenne M. A., Bizzi L. A., Schobbenhaus C., Vidottie R. M. Depósitos Minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogénicas. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil, Gonçalves J.H (eds.)*, CPRM, Brasília, 2003, Capítulo VII, pp. 359–465.
21. Tassinari Colombo C. G., Munha M. U., Teixeira W., Palacios T. A., Nutman Allen P., Sosa Cesar S., Santos Adjair P., and Calado Bruno O. The Imataca Complex, NW Amazonian Craton, Venezuela: Crustal evolution and integration of geochronological and petrological cooling histories episodes Jose. *Episodes, March* 2004, vol. 27, no. 1, pp. 3–13.
22. Kaouat Iron Ore Project Mauritania: Available at: URL: www.transafrikaresources.com/.../transafrik... (accessed 01.03.2023).
23. Zhai Mingguo, Windley Brian F. The Archaean and early Proterozoic banded iron formations of North China: their characteristics, geotectonic relations, chemistry and implications for crustal growth / References and further reading may be available for this article. To view references and further reading you must purchase this article. *Precambrian Research*, 1990, vol. 48. I. 3, pp. 267–286.
24. *Geologija SSSR. T. XVIII: Jakutskaja ASSR. Poleznye iskopaemye* [Geology of the USSR Vol. XVIII: Yakut ASSR. Mineral resources]. Moscow, Nedra publ., 1979, 412 p. (In Russ.)
25. Razvitie zolotodobyvajushhej promyshlennosti i osvoenie mestorozhdenij cvetnyh metallov v Respublike Saha (Jakutija) v 2007–2009 gg. Vedomstvennaja celevaja programma [Development of gold mining industry and development of non-ferrous metal deposits in the Republic of Sakha (Yakutia) in 2007–2009. Departmental target program]: Available at: minprom-sakha.ru/files/zolotodob.pdf..... (accessed 21.03.2023) (In Russ.)
26. Bark, Glenn. Orogenic gold in the new Lycksele-Storuman ore province, northern Sweden; the Palaeoproterozoic Fäboliden deposit. *Glenn Bark & Pär Weihed. Licenciata Thesis, Luleå University of Technology*, 2005, 25 p.
27. Sciuba, Marjorie. Mineralogy and Geochemistry of the Banded Iron-Formation in the Svartliden Gold Deposit, Northern Sweden. *Marjorie Sciuba*, 2013, 109 p.
28. Kostomukshskoe zhelezorudnoe mestorozhdenie [Kostomuksha iron ore deposit]: Available at: ru.wikipedia.org (accessed 01.03.2023) (In Russ.)
29. Shhegolev I.N. *Zhelezorudnye mestorozhdenija dokembrija i metody ih izuchenija* [Iron-ore deposits of Precambrian and methods of their study]. Moscow, Nedra publ., 1985, 192 p. (In Russ.)
30. Iron Ore Production by Country 2022: Available at: URL: www.statista.com/statistics/267380/iron-ore-mine-production-by-country (accessed 15.06.2023).
31. Hamersli (Hamersley), zhelezorudnyj bassejn v Avstralii, v shtate Zap. Avstralija [Hamersley, iron ore basin in Australia, in the state of Western Australia]: Available at: URL: old.bigenc.ru/geology/text/4728788 (accessed 01.06.2023) (In Russ.)
32. Beukes N. J., Gutzmer J. Origin and paleoenvironmental significance of major iron formations at the Archean–Paleoproterozoic boundary. *Soc. Econ. Geol. Rev.*, 2008, vol. 15, pp. 5–47.
33. Savko K. A., Samsonov A. V., Holin V. M., Bazikov N. S. Megablock Sarmatija kak oskolok superkratona Vaalbara: korreljacija geologicheskikh pozicij na granice arheja i paleoproterozoja [Sarmatia megablock as a fragment of the Vaalbar supercraton: correlation of geologic positions at the Archean–Paleoproterozoic boundary]. *Stratigrafija. Geologicheskaja korreljacija – Stratigraphy. Geologic Correlation*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 3–32 (In Russ.)
34. Mineral'no-syr'evye resursy KMA [Mineral and raw material resources of KMA]: Available at: URL: textarchive.ru/c-1845210-p2.html. (accessed 15.06.2023) (In Russ.)
35. Golivkin N. I., Kononov N. D., Orlov V. P. *Zheleznyye rudy KMA* [Iron Ores of KMA]. Ed. V. P. Orlov. Moscow, CJSC "Geoinformmark" publ., 2001, 616 p. (In Russ.)
36. Belevcev Ja. N., Kulik D. A., Korzhnev M. N. *Zhelezisto-kremnistye formacii dokembrija* [Iron-siliceous formations of the Precambrian]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1992, 228 p. (In Russ.)
37. Zheleznaia ruda Ukrainy – Zapasy zheleznyh rud [Iron Ore of Ukraine – Iron Ore Reserves]: Available at: URL: studwood.net/1639574/geografiya...ruda_ukrainy. (accessed 15.07.2023) (In Russ.)
38. Savko A. D., Dodatko A. D. *Kory vyvetrivaniya v geologicheskoi istorii Vostochno-Evropejskoj platform* [Weathering crusts in the geologic history of the East European Platform]. Voronezh, VSU publ., 1991, 232 p. (In Russ.)
39. Il'in A. V. Neoproterozojskie zhelezistyje kvarcity [Neoproterozoic ferruginous quartzites]. *Litologija i poleznye iskopaemye – Lithology and Mineral Resources*, 2009, no. 1, pp. 87–95 (In Russ.)
40. Chumakov N. M. Oledeneniya Zemli. Istorija, stratigraficheskoe znachenie i rol' v biosfere [Glaciations of the Earth. History, stratigraphic significance and role in the biosphere]. *Trudy Geologicheskogo in-ta RAN – Proceedings of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences*. Moscow, GEOS publ., 2015, vol. 61.1, 160 p. (In Russ.)
41. Zhelezistyje kvarcity: svojstva, proishozhdenie, sostav porody i osnovnye mestorozhdenija [Ferruginous quartzites: properties, origin, rock composition and main deposits]: Available at: URL: <https://fb.ru/article/443623/jelezistyie-kvartsityi-svoystva-proishozhdenie-sostav-porodyi-i-osnovnye-mestorojdeniya?ysclid=lmiiybe-seuz672236493> (accessed 05.06.2023) (In Russ.)
42. El Mutún From Wikipedia, the free encyclopedia Geology of Bolivia – Wikipedia Available at: URL: the-free-encyclopedia.en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_Bolivia (accessed 01.05.2023).
43. Gaucher Claudio, Alcides L. Sial, Robert Frei Chemostratigraphy of Neoproterozoic Banded Iron Formations (BIF): Types, age, and origin. Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications. Chapter 17. [Mu. Ramkumar, ed.]. *Amsterdam-Oxford-Waltham: Elsevier*, 2015, pp. 433–450.
44. Khalil, Isaac. Banded Iron Formations from the Eastern Desert of Egypt: A new type of Ore? / Isaac Khalil and Aley K. El-Shazly //

- Session 02d (Poster): Precambrian sediments as records of early earth tectonics and ocean-atmosphere-biosphere interactions. – Poster # 24. – Banded Iron Formations from the Eastern Desert ... Marshall University Available at: URL: www.science.marshall.edu/elshazly/Khalil_Elshazly_Goldsch... (accessed 01.07.2023)
45. Macdonald E. F., Smith J. V., Strauss G. M., Cox G. P., Halverson C. F. A. Neoproterozoic and early Paleozoic correlations in the western Ogilvie Mountains, Yukon. *Yukon Exploration and Geology*, 2010 [K.E. MacFarlane, L.H. Weston and C. Relf, eds.]. *Yukon Geological Survey*, 2011, pp. 161–182.
46. Pitman, Paul. Technical Report on the CERRO ROJO PROJECT Department de Santa Cruz Provincia German Busch 58° 15' to 58° 21' west, 19° 02' to 19° 06' north BOLIVIA. Paul Pitman, 2011, 102 p.
47. Cornelis Klein and Eduardo A. Ladeir. Geochemistry and mineralogy of neoproterozoic banded iron-formations and some selected, siliceous manganese formations from the Uruçum district, Mato Grosso do sul, Brazil. *Economic Geology*, 2004, vol. 99, pp. 1233–1244.
48. Geoffrey J. Baldwin, Thomas F. Näglerb, Nicolas D. Greber, Elizabeth C. Turner, Balz S. Kamber. Mo isotopic composition of the mid-Neoproterozoic ocean: An iron formation perspective. *Precambrian Research*, vol. 230, 2013, pp. 168–178.
49. Arce-Burgoa, Osvaldo R. Metallogeny of Bolivia / Osvaldo R. Arce-Burgoa, Richard J. Goldfarb Available at: URL: www.dim.uchile.cl/~lsaavedr/.../Metallogeny%20of%20Bolivia.pdf (accessed 01.06.2023)
50. Hoffman P.F., Kondon D.J., Bowring S.A. et al. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia. *Geology*, 2004, vol. 32, P. 817–820.
51. Key R.M., Liyungu A.K., Njama F.M., Somwe V., Banda J., Mosley P.N., Armstrong R.A. The western arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and its potential for copper mineralization. *J. Afr. Earth Sci.*, 2001, vol. 33, I. 3/4, pp. 503–528.
52. Hofmann M., Linnemann U., Hoffmann K.-H., Germs G., Gerdes A., Marko L., Eckelmann K., Gärtner A., Krause R. The four Neoproterozoic glaciations of southern Namibia and their detrital zircon records: The fingerprints of four crustal growth events during two supercontinent cycles. *Precambrian Res.*, 2014, vol. 259, pp. 176–188.
53. Dardir A. A. States and futures development of iron and steel industry in Egypt: internal report. Geological Survey and Mineral Authority. Egypt, 1990, 22 p.
54. Preiss W. V., Gostin V. A., Mckirdy D. M., Ashley P. M., Williams G. E., Schmidt Ph. W. The glacial succession of Sturtian age in Soutg Australia: The Yudnamutana Subgroup. Ed. E. Arnaud, G. P. Halverson, G. Shields-Zhou. *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*, 2011, no. 36, pp. 701–712.
55. Barford G. H., Albarede F., Kroll A. H., et al. New Lu-Hf and Pb-Pb age constraints on the earliest animal fossils. *Earts and Planetary Sci. Letters*, 2002, no. 201, pp. 203–212
56. Yin C, Tang F., Lin Y., et al. U-Pb zircon age from the base of the Ediacaran formation, South China: constraint of the age of Marinoan glaciation. *Episodts*, 2005, no. 1, pp. 48–49.
57. Tretjakov A. A., Degtjarev K. E., Danukalov N. K., Kanygina N. A. Neoproterozojskij vozrast zhelezorudnoj vulkanogenno-osadochnoj serii Ulutauskogo terrejna (Central'nyj Kazahstan) [Neoproterozoic age of iron-ore volcanogenic-sedimentary series of the Ulutau terrane (Central Kazakhstan)]. *DAN. Nauki o Zemle – DAN. Earth Sciences*, 2022, vol. 502, no. 2, pp. 49–55 (In Russ.)
58. Arhipov G. I. *Zhelezorudnye mestorozhdenija: Geodinamika, magmatizm i metallogenija vostoka Rossii* [Iron Ore Deposits: Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of Eastern Russia. Book 2]. Khsabarovsk, FEB RAN publ., 2007, pp. 741–747.
59. Sedimentology and Geochemistry of Glaciogenic... Available at: URL: eongeo.geoscienceworld.org/cgi... . 542 p. (accessed 01.03.2023).
60. Bergman I. A. O genezise zhelezisto-kremnistoj formacii Rapitan pozdneproterozojskogo vozrasta (Severo-Zapadnaja Kanada) [On the genesis of iron-siliceous Rapitan Formation of Late Proterozoic age (Northwestern Canada)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016, no. 4, pp. 15–17 (In Russ.)
61. Holodov V. N., Nedoumov R. N. Golubovskaja R. E. Facial'nye tipy osadochnyh zhelezorudnyh mestorozhdenij i ih geohimicheskie osobennosti. Soobshhenie 1. Facial'nye gruppy osadochnyh rud, ih litologija i genezis [Facies types of sedimentary iron ore deposits and their geochemical features. Message 1. Facies groups of sedimentary ores, their lithology and genesis]. *Litologija i poleznye iskopaemye – Lithology and Mineral Resources*, 2012, no. 6, pp. 503–531 (In Russ.)
62. Holodov V. N., Nedoumov R. N. Golubovskaja R. E. Facial'nye tipy osadochnyh zhelezorudnyh mestorozhdenij i ih geohimicheskie osobennosti. Soobshhenie 2. Problemy geohimii fanerozojskih osadochnyh rud [Facies types of sedimentary iron ore deposits and their geochemical features. Message 2. Problems of geochemistry of Phanerozoic sedimentary ores]. *Litologija i poleznye iskopaemye – Lithology and Mineral Resources*. 2013, no. 1, pp. 17–52 (In Russ.)
63. Savko A. D., Shevyrev L. T. Istoriko-mineragenicheskiy analiz geologicheskogo proshlogo kontinentov. St. 2. Kaledonskij jetap [Historical and mineralogical analysis of the geologic past of the continents. Art. 2. Caledonian stage]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2009, no. 1, pp. 5–30 (In Russ.)
64. *Rudnye mestorozhdenija SSHA* [Ore deposits of the USA]. In 2 vol. Moscow, Mir publ., 1973, vol. 2, 636 p. (In Russ.)
65. Savko A. D., Nikulin I. I., Ovchinnikova M. Ju., Boeva N. M. Istoriko-geneticheskiy analiz formirovaniya bogatyh zheleznyh rud i svjazannyh s nimi boksitov Kurskoj magnitnoj anomalii [Historical and genetic analysis of the formation of rich iron ores and associated bauxites of the Kursk Magnetic Anomaly]. *Litologija i poleznye iskopaemye – Lithology and Mineral Resources*, 2022, no. 4, pp. 334–343 (In Russ.)
66. Nikulin I. I., Savko A. D., Merkushova M. Ju. Tipy gipergennyh bogatyh zheleznyh rud Belgorodskogo rajona Kurskoj Magnitnoj Anomalii [Types of hypergenic rich iron ores of Belgorod region of Kursk Magnetic Anomaly]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 3, pp. 71–82 (In Russ.)
67. Nikulin I. I. *Geologija i genezis mestorozhdenij gipergennyh zheleznyh rud (na primere Kurskoj magnitnoj anomalii)* Diss. ... d-ra geol. min. nauk [Geology and genesis of hypergene iron ore deposits (on the example of Kursk magnetic anomaly) Diss. Dr. geol. min. Sciences] Moscow, MSU publ., 2017, 442 p. (In Russ.)
68. Merkushova M. Ju., Nikulin I. I. Sravnitel'nyj analiz bogatyh zheleznyh rud Belgorodskogo i Starooskol'skogo zhelezorudnyh rajonov KMA [Comparative analysis of rich iron ores of Belgorod and Starooskol iron ore districts of KMA]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 4, pp. 107–113 (In Russ.)
69. Merkushova M. Ju., Zhegallo E. A. Biomorfnye struktury v bogatyh zheleznyh rudah KMA (po rezul'tatam jelektronno-mikroskopicheskogo issledovanija) [Biomorphic structures in rich iron ores of KMA (based on the results of electron microscopic study)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016, no. 2, pp. 150–154 (In Russ.)
70. Ovchinnikova M. Ju. Zhegallo A. E. Iskopaemye organizmy i sledy ih zhiznedejatel'nosti v boksitah KMA [Fossil organisms and traces of their life activity in bauxites of KMA]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 2, pp. 141–145 (In Russ.)
71. Dill H. G. Sachsenhofer R. F., Greculs P., Sasvari T., Palinkas L. A. Fossil fuels, ore and industrial minerals. *The geology of Central Europe: Mesozoic and Cenozoic*, Geological Society of London, 2008, pp. 1341–1371.
72. *Jepohi koroobrazovanija v istorii Voronezhskoj anteklizy* [Epochs of crust formation in the history of the Voronezh Anticline]. Voronezh, VSU publ., 1979. 119 p. (In Russ.)

73. Lotaringskij zhelezorudnyj bassejn [Lorraine iron ore basin] Available at: URL: <http://mining-enc.ru/lotaringskij-zhelezorudnyj-bassejn>. (accessed 01.03.2023) (In Russ.)
74. Belevcev Ja. N. Epatko Ju. M., Verigin M. I., Lebedev Ju. S., Maljutin E. I. *Zhelezorudnye mestorozhdenija Ukrainy i ih prognoz-naja ocenka* [Iron ore deposits of Ukraine and their prognostic evaluation]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1981, 232 p. (In Russ.)
75. Ramadan T. M., Hassaan M. M., Sultan A. S., El Kelani A. Use of remote sensing air-borne magnetic and geochemical data in the exploration for iron deposits in the Oweinat-El Kharga district, Western desert, Egypt. *Ustralian Journ. Of Basic fnd Applied Sciences*, 2009, vol. 3(1), pp. 254–266.
76. Ojo Olusola J. Sedimentary Facies Relationships and Depositional Environments of the Maastrichtian Enagi Formation, Northern Bida Basin, Nigeria. *Journal of Geography and Geology*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 136–147.
77. Dobycha rud v Avstralii: krupnejshie mestorozhdenija i jesport [Ore mining in Australia: largest deposits and esports] Available at: URL: <https://i-avstraliya.ru/etnicheskoe-razvitie-avstralii/dobycharud-v-avstralii.html?ysclid=lm97r3s16z402035536> (accessed 10.08.2023) (In Russ.)
78. Incyclopedya Britannica. Available at: URL: <http://media-3.web.britannica.com/eb-media/86/20286-004-FF39DD42.jpg>. (accessed 10.08.2023).
79. Shevyrev L. T., Savko A. D. Rudnye mestorozhdenija Rossii i Mira [Ore deposits of Russia and the World. D. Ore deposits of Russia and the World. 2nd ed.]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 82, 2016, 402 p. (In Russ.)
80. Guinea Economic analysis. The most important. Available at: URL : <http://www.guinea.aha.ru>. (accessed 10.08.2023).
81. Vershinin A. S. *Geologija, poiski i razvedka gipergerennyh mestorozhdenij nikaelja* [Geology, Prospecting and Exploration of Hypergenic Nickel Deposits]. Moscow, Nedra publ., 1993, 302 p. (In Russ.)
82. Lazarenkov V. G., Talovina I. V., Beloglazov I. I., Volodin V. I. *Platinovye metally v gipergerennyh nikelovyh mestorozhdenijah i perspektivy ih promyshlennogo izvlechenija* [Platinum metals in hypergenic nickel deposits and prospects for their industrial extraction]. St. Petersburg, Nedra publ., 2006, 188 p. (In Russ.)
83. Bolonin A. V., Myznikov I. K., Nigmatullina A. M. Bogatye zheleznye rudy v lateritnoj kore vyvetrivaniya poloschatoj zhelezistoj formacii v gornom hrebte Simandu (Gvinejskaja Respublika) [Rich iron ores in lateritic weathering crust of the banded iron formation in the Simandou Mountain Range (Guinea Republic)]. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2023, no. 2, pp. 44–63 (In Russ.)
84. Detailed information dossier (DID) on iron ores in India. Geological Survey of India, 1994, Government of India, 2006, 194 p.
85. Zhelezorudnye mestorozhdenija [Iron ore deposits] Available at: URL: okvsk.ru/...chuguna... (accessed 01.06.2023) (In Russ.)
86. What are the Major Iron Ore Belts in India? Available at: www.geeksforgoeks.org/what-are-the-major-iron-ore-belts-in-india. (accessed 26.05.2023).
87. Bugel'skij Ju. Ju., Vaskes O., Grigor'eva I. I. *Rudnye mestorozhdenija Kuby* [Ore deposits of Cuba]. Moscow, Nauka publ., 1985, 242 p. (In Russ.)
88. Mazurov A. K., Bojarko G. Ju., Emeshev V. G., Komarov A. V. Perspektivy osvoenija Bakcharskog mestorozhdenija zheleznyh rud, Tomskaja oblast' [Prospects of development of Bakchar iron ore deposit, Tomsk region]. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2006, no. 2, pp. 4–70 (In Russ.)
89. Asochakova E. M., Konovalenko S. I. Geohimicheskie osobennosti zheleznyh rud Bakcharskogo mestorozhdenija (Zapadnaja Sibir') [Geochemical features of iron ores of Bakchar deposit (Western Siberia)]. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. – Proceedings of Tomsk State University. Earth Sciences*, 2007, no. 305, pp. 219–222 (In Russ.)
90. Rudmin M. A., Mazurov A. K., Ruban A. S. Morfologija i veshhestvennyj sostav zheleznyh rud Bachkarskogo rudoprojavlenija (Tomskaja oblast') [Morphology and material composition of iron ores of the Bachkarskoye ore occurrence (Tomsk region)]. *Fundamental'nye issledovanija – Fundamental Research*, 2014, no. 11–6, pp. 1323–1327 (In Russ.)
91. O genezise Bakcharskogo mestorozhdenija zheleza [On the genesis of the Bakchar iron deposit] Available at: URL: kommersant.ru/Hayka (accessed 20.07.2023) (In Russ.)
92. Pshenichkin A. Ja., Domarenko V. A. Petrografo-geohimicheskie osobennosti rud Bakcharskogo mestorozhdenija [Petrographic and geochemical features of ores of Bakchar deposit]. *Vestnik nauki Sibiri. 1. Nauki o Zemle – Proceedings of Science of Siberia. 1. Earth Sciences*, 2011, no. 1, pp. 13–18 (In Russ.)
93. Lisakovskoe mestorozhdenie. Geologija metallov [Lisakovskoye deposit. Geology of metals] Available at: URL: votdoklad.ru/>643.html... (accessed 24.08.2023) (In Russ.)
94. Kaskataeva K. B., Krjazheva T. V., Sadchikov A. V., D'jakonov V. V. Harakteristika rud lisakovskogo mestorozhdenija s cel'ju ih kompleksnoj pererabotki [Characterization of ores of the Lisakovskoye deposit for the purpose of their complex processing]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 7–13 (In Russ.)
95. Mestorozhdenija zheleznoj rudy. Kazahstan i Srednjaja Azija [Iron ore deposits. Kazakhstan and Central Asia] Available at: URL : [http // posledneeslovo.ru/kazahstan-i-srednyaya-aziya/](http://posledneeslovo.ru/kazahstan-i-srednyaya-aziya/) (accessed 26.08.2023) (In Russ.)
96. Academic Dictionaries and Encyclopedias [Электронный ресурс] Available at: URL : http://dic.academic.ru/pictures/enc_geolog/1001.jpg. (accessed 26.08.2023)
97. Hejzen R. *Istorija Zemli: ot zvezdnoj pyli k zhivoj planete. Pervye 4500 000 000 let.* [Earth History: From Stardust to Living Planet. The first 4500,000,000 years]. Moscow, Dynasty publ., 2015, 345 p. (In Russ.)
98. Gaucher, Claudio. Chemostratigraphy of Neoproterozoic Banded Iron Formations (BIF): Types, age, and origin. Claudio Gaucher, Alcides L. Sial, Robert Frei. *Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications*, 2015, vol. 17, pp. 433–450.
99. Sedimentology and Geochemistry of Glaciogenic... Available at: URL: econgeol.geoscienceworld.org/cgi/... 542.p (accessed 01.03.2023).
100. Webby B. D., Drosel M., Paris F., Percival I. (Ed.). *The Great Ordovician Biodiver-sification Event*. NewYork: Columbia Univ, Press, 2004, 484 p.
101. Butterfield N. J. Hooking some stem-groop worms: fossil lophotrochozoans in the Burges Shale, Bioessays, 2006, vol. 28, no. 12, pp 1161–1166

Савко Аркадий Дмитриевич, д. г.-м. н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская федерация; e-mail: savko@geol.vsu.ru; ORCID 0000–0003–2133–3317

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Arkady D. Savko, Dr. habil. in Geol.-Min, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: savko@geol.vsu.ru; ORCID 0000–0003–2133–3317

Author have read and approved the final manuscript.