

УДК 553.3:551.71/.72

## ЖЕЛЕЗОРУДНЫЕ ФОРМАЦИИ ДОКЕМБРИЯ: ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ И ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ

**П. В. Медведев**

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»  
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)*

Древнейшие железорудные образования – богатые железом и кремнеземом хемогенные осадочные породы докембрийского возраста содержат информацию об экологических условиях в архейском (4,0–2,5 млрд лет назад) и протерозойском (2,5–0,539 млрд лет назад) зонах. Несмотря на разногласия относительно механизмов их образования, железорудные формации являются свидетельством влияния докембрийской биосферы на химический состав древнего океана. Поскольку многие железорудные образования представляют собой хемогенные осадки, отражающие состав вод бассейна, они могут служить подробными геохимическими архивами для реконструкции температуры древних морей, окислительно-восстановительных условий и круговорота химических элементов.

Ключевые слова: архей; протерозой; железорудные формации; условия образования; микроорганизмы

Для цитирования: Медведев П. В. Железорудные формации докембрия: палеоэкологический и палеонтологический аспекты // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 95–98. doi: 10.17076/geo1676

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00026 по проекту «Геодинамические обстановки ранней Земли и архейские полосчатые железистые кварциты».

### **P. V. Medvedev. PRECAMBRIAN IRON FORMATIONS: PALEOECOLOGICAL AND PALEONTOLOGICAL ASPECTS**

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences  
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

Ancient iron formations – Precambrian chemogenic sedimentary rocks rich in iron and silica contain information about environmental conditions in the Archean (4.0–2.5 Ga) and Proterozoic (2.5–0.539 Ga) eons. Despite disagreements about the mechanisms of their genesis, iron formations are evidence of the influence of the Precambrian biosphere on the chemical composition of the ancient ocean. Since many iron ore formations are chemogenic deposits reflecting the composition of the waters from which they had precipitated, they can also serve as detailed geochemical archives for studying the temperature of ancient seas, redox states and the cycle of chemical elements.

Keywords: Archean; Proterozoic; iron formations; depositional environments; microorganisms

For citation: Medvedev P. V. Precambrian iron formations: paleoecological and paleontological aspects. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022;5:95–98. doi: 10.17076/geo1676

Funding. The study was funded by Russian Science Foundation grant # 22-17-00026 for the project “Early-Earth geodynamic environments and Archean banded iron formations”.

Железорудные формации (ЖФ) представляют собой богатый железом тип горных пород, который характерен для многих архейских и протерозойских супракрустальных толщ и является химическим архивом состава докембрийской морской воды и круговорота железа после осаждения. Учитывая, что они накапливались на морском дне в течение более двух миллиардов лет ранней истории Земли, перемены в химическом, минеральном и изотопном составе ЖФ дают уникальную возможность проследить за изменениями окружающей среды на эволюционирующей Земле. Возможно, одним из наиболее значимых событий стал переход от бескислородной планеты к планете, где кислород постоянно присутствовал в толще морской воды и атмосфере. С этим постепенным глобальным насыщением кислородом была связана эволюция аэробного микробного метаболизма, который фундаментально повлиял на процессы континентального выветривания, поступление питательных веществ в океаны и, в конечном счете, диверсификацию биосферы и возникновение сложных форм жизни. Многие из ключевых современных открытий в понимании генезиса ЖФ связаны с геобиологией, поскольку биологически поддерживаемое окисление двухвалентного железа ( $Fe^{2+}$ ) либо напрямую посредством фотоферротрофии, либо косвенно посредством кислородного фотосинтеза обеспечивает процесс осаждения ЖФ. Обилие и изотопный состав минералов, содержащих  $Fe^{2+}$ , в ЖФ предполагают восстановление трехвалентного железа ( $Fe^{3+}$ ) микроорганизмами (археями и бактериями). Связи между геобиологией, гидротермальными системами и образованием ЖФ традиционно игнорировались, но теперь формируют согласованную модель для этого уникального типа горных пород [Mänd et al., 2022].

Железорудные формации – это богатые железом (15–40 мас. % Fe) и кремнистые (40–60 мас. %  $SiO_2$ ) хемогенные осадочные породы, которые выпадали в осадок из морской воды на протяжении докембрийского времени

в интервале между 2,80 и 1,85 млрд лет назад (неоархей и палеопротерозой). На минимальное поступление детрита при отложении глубоководных ЖФ указывают низкие концентрации  $Al_2O_3$  (<1 мас. %) и микроэлементов, которыми обогащены породы земной коры (Ti, Zr, Th, Hf и Sc < 20 промилле) [Konhauser et al., 2017]. Большинство ЖФ демонстрируют характерную полосчатость переменной толщины, от макрополос (толщиной в метр) до мезополос (толщиной в сантиметр) и микрополос (миллиметровой и субмиллиметровой толщины), по которым определяются полосчатые железорудные формации (BIF). Микрополосы связаны с эпизодическим гидротермальным воздействием, которое, как предполагалось ранее, представляет собой годовой процесс осаждения. Полосчатость в BIF может быть обширной по площади, указывающей на отложение ниже уровня волн. Некоторые ЖФ, известные как гранулированные железные формации (GIF), лишены этой характерной полосчатости и состоят из гранул кремнезема и оксидов или силикатов железа с раннедиагенетическим кремнистым, карбонатным или гематитовым цементом, заполняющим поровое пространство [Bekker, Kovalick, 2021]. Обычно считается, что GIF осаждались вблизи берега на мелководье. ЖФ всех типов могут предоставить важную информацию о составе вод древних океанов, но только в том случае, если можно разделить физическую и химическую среду отложения, тектоническую обстановку бассейна, первичные и вторичные геохимические сигналы.

ЖФ в широком смысле делятся на два типа – Алгома и Сьюпериор, в зависимости от условий осаждения, хотя логичнее рассматривать эти типы как крайние члены, имеющие спектр промежуточных разновидностей [Bekker et al., 2014]. ЖФ типа Алгома переслаиваются или стратиграфически и генетически связаны с подводными мафит-ультрамафитовыми и фельзитовыми вулканическими породами, вулканокластическими граувакками и сланцами в зеленокаменных поясах, а во многих случаях

пространственно приурочены к вулканогенным месторождениям массивных сульфидных руд [Bekker et al., 2014]. ЖФ типа Алгома, по-видимому, образовались вблизи вулканических дуг и центров спрединга в результате эксгальационных гидротермальных процессов, связанных с подводным вулканизмом. Они содержат оксидную, силикатную и карбонатную фации и обычно классифицируются как сульфидные отложения, которые могут быть обогащены медью, цинком, свинцом, серебром и золотом. Отсутствие каких-либо седиментологических особенностей, кроме тонкой полосчатости (т. е. отсутствие осадочных текстур, генерируемых течением, приливом или волной) в ЖФ типа Алгома указывает на глубоководную среду осадконакопления, вероятно, удаленную от континентальных массивов суши. В этом отношении ЖФ типа Алгома имеют составы, которые отражают влияние местных гидротермальных флюидов в частично закрытых бассейнах или в открытоморских системах [Konhauser et al., 2017]. ЖФ, которые выпали в осадок ранее 3,0 млрд лет назад, обычно описываются как алгомского типа, хотя есть и более поздние примеры возрастом 2,7–2,6 млрд лет, а также неалгомские мелководноморские ЖФ толщи в палеоархее. Крупнейшее железорудное месторождение Карелии – Костомукшское, приуроченное к одноименному зеленокаменному поясу, относится к типу Алгома. Недавние геохронологические исследования показали, что осадконакопление железосодержащих толщ происходило одновременно с кислым вулканизмом в интервале 2759–2743 млн лет в субдукционной геодинамической обстановке [Слабунов и др., 2021, 2022].

Напротив, ЖФ типа Сьюпериор развивались в условиях пассивной окраины с преобладанием осадконакопления (т. е. после образования стабильных континентальных шельфов) и, как правило, не имеют прямых стратиграфических связей с вулканическими породами. Считается, что эти ЖФ формировались в прибрежных шельфовых средах, поскольку обычно переслаиваются с карбонатами и черными сланцами. В отличие от большинства ЖФ типа Алгома, которые редко прослеживаются более чем на 10 км по простиранию и обычно имеют мощность не более 50 м, ЖФ типа Сьюпериор могут иметь первоначальную площадь осадконакопления, превышающую 100 000 км<sup>2</sup> [Bekker et al., 2014]. С точки зрения запасов самые крупные ЖФ типа Сьюпериор содержат более 10<sup>14</sup> тонн железа [Konhauser et al., 2017], обеспечивая большую часть железа, необходимого для мировой экономики. Например,

бассейны Хамерсли в Австралии, Минас-Жерайс в Бразилии, Трансваальский в Южной Африке, Кривой Рог (Украина) и Лабрадорский трог (Канада).

BIF доминируют в эоархейских и раннепалеопротерозойских последовательностях и состоят из перемежающихся полос, богатых железом и кремнеземом. BIF осаждались в относительно глубоководных условиях, поскольку в них обычно отсутствуют свидетельства воздействия волн или штормов. Большинство BIF обычно перекрываются или подстилаются богатыми органическим веществом и сульфидами сланцами, а в некоторых случаях переслаиваются с ними.

GIF впервые появляются в геологической летописи около 2,90 млрд лет назад [Konhauser et al., 2017], достигают своего пика около 1,88 млрд лет назад, сменяясь железняками в фанерозойской летописи (после 543 млн лет назад) [Bekker et al., 2014]. GIF характеризуются наличием гранул, которые могут различаться по морфологии, размеру (от микрометров до сантиметров в диаметре) и составу (кремнезем, оксиды железа, карбонаты железа и/или силикаты железа); цемент обычно представляет собой кремнезем, карбонат или гематит. Многие из гранул рассматриваются как обломочные, причем некоторые из них получены в результате разрушения богатых железом глин, аргиллитов, аренигов и строматолитов. Другой генезис имеют, например, оолитовые породы свиты Тимболл Хилл в Южной Африке (2,32 млрд лет), состоящие из концентрических корковых отложений гематита, которые, вероятно, осаждались на малой глубине, где богатые Fe<sup>2+</sup> воды встречались с более насыщенной кислородом морской водой. В породе могут преобладать как гранулы, так и цемент. Наличие осадочных текстур, образованных волнами и течением, например, кривой слоистости, указывает на то, что гранулы образовались у берега на глубине, близкой к основанию волн.

Выяснение генезиса ЖФ продвинулось быстрыми темпами в последние годы, поскольку эти характерные хемогенные отложения активно используются в качестве палеоокеанографических архивов. Одним из достижений является понимание коэволюции процессов на поверхности Земли с микробным метаболизмом во время архейско-протерозойского перехода. Геологическая летопись ЖФ помогла понять эволюцию аэробного метаболизма, связанного с более ранней экспансией цианобактерий по всей поверхности океанов во время перехода от архея к протерозою.

## Литература

Слабунов А. И., Кервинен А. В., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Максимов О. А., Медведев П. В. Полихронная история формирования полосчатых железистых кварцитов главной рудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса: возраст цирконов и акцессорные минералы // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 139–143. doi: 10.17076/geo1666

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Кулешевич Л. В., Кевлич В. И. Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита // Геохимия. 2021. Т. 66(4). Р. 291–307. doi: 10.31857/S0016752521040063

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations // Alderton D., Elias S. A., eds. *Encyclopedia of Geology* (2nd ed.), Oxford: Academic Press, 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5

Bekker A., Planavsky N. J., Rasmussen B., Krapež B., Hofmann A., Slack J., Rouxel O., Konhauser K. Iron formations: Their origins and implications for ancient seawater chemistry // Holland H. D., Turekian K. K., eds., *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.), Oxford: Elsevier, 2014. P. 561–628. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00719-1

Konhauser K. O., Planavsky N. J., Hardisty D. S., Robbins L. J., Warchola T. J., Haugaard R., Lalonde S. V., Partin C. A., Oonk P. B. H., Tsikos H., Lyons T. W., Bekker A., Johnson C. M. Iron formations: A global record of Neoproterozoic to Palaeoproterozoic environmental history // *Earth-Science Rev.* 2017. Vol. 172. P. 140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Mänd K., Robbins L., Planavsky N., Bekker A., Konhauser K. Iron formations as Palaeoenvironmental archives (elements in geochemical tracers in Earth System Science). Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 44 p. doi: 10.1017/9781108993791

## References

Bekker A., Kovalick A. Ironstones and iron formations. Alderton D., Elias S. A., eds. *Encyclopedia of Geology* (2nd ed.), Oxford: Academic Press; 2021. P. 914–921. doi: 10.1016/B978-0-08-102908-4.00199-5

Bekker A., Planavsky N. J., Rasmussen B., Krapež B., Hofmann A., Slack J., Rouxel O., Konhauser K. Iron formations: Their origins and implications for ancient seawater chemistry. Holland H. D., Turekian K. K., eds. *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.), Oxford: Elsevier; 2014. P. 561–628. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00719-1

Konhauser K. O., Planavsky N. J., Hardisty D. S., Robbins L. J., Warchola T. J., Haugaard R., Lalonde S. V., Partin C. A., Oonk P. B. H., Tsikos H., Lyons T. W., Bekker A., Johnson C. M. Iron formations: A global record of Neoproterozoic to Palaeoproterozoic environmental history. *Earth-Science Rev.* 2017;172:140–177. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Mänd K., Robbins L., Planavsky N., Bekker A., Konhauser K. Iron formations as Palaeoenvironmental archives (elements in geochemical tracers in Earth System Science). Cambridge: Cambridge University Press; 2022. 44 p. doi: 10.1017/9781108993791

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Egorov A. V., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Polychronous evolution of Neoproterozoic banded iron formation in the main ore sequence of the Kostomuksha greenstone belt: the age of zircons and accessory minerals. *Trudy Karelianskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2022;5:139–143. doi: 10.17076/geo1666

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Egorov A. V., Kuleshevich L. V., Kevlich V. I. Age of the Archean strata with banded iron formation in the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield: Constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. *Geochem. Int.* 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Поступила в редакцию / received: 22.08.2022; принята к публикации / accepted: 29.08.2022.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Медведев Павел Владимирович**

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник  
лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: pmedved@krc.karelia.ru

## CONTRIBUTOR:

**Medvedev, Pavel**

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher