

УДК 550.72:551.72

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ АРХЕЯ-ПРОТЕРОЗОЯ

В. Г. Кузнецов

Представлено академиком РАН А.Н. Дмитриевским 12.04.2018 г.

Поступило 03.05.2018 г.

В докембрийском разрезе отмечается смена карбонатных пород — кальциевых и железистых архея магнезиальными в протерозое. Это коррелируется с массовым развитием цианобактерий, усвоение которыми углекислого газа и генерацией кислорода, привело к смене кислых восстановительных обстановок архея щелочными окислительными в протерозое.

*Ключевые слова:* архей, протерозой, карбонатные породы, кислотно-щелочные условия.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524884403-407>

Докембрийская история, охватывающая 7/8 геологической истории планеты, предопределила развитие и обстановки внешних геосфер, где происходит осадочный процесс уже в фанерозое. Последний среди прочего определяется рядом геохимических показателей, важнейшими из которых являются окислительно-восстановительные и кислотно-щелочные свойства среды. Реконструкции первого показателя для докембрийского этапа достаточно многочисленны и весьма результативны. Важнейшее, если не определяющее значение, при этом имеет изучение изотопных соотношений. Менее исследованы кислотно-щелочные условия и их изменение в течение этого отрезка геологического времени. Важные сведения по этому вопросу может дать изучение карбонатных пород и изменение их состава, поскольку они являются достаточно чувствительными индикаторами рН среды. Существенно упрощая, можно говорить, что в целом карбонаты железа (сидерит) образуются в умеренно кислых условиях, карбонаты кальция (кальцит, горная порода известняк) в нейтральных и слабо щелочных, двойная соль кальция и магния (доломит) в умеренно щелочных, а магния (магнезит) в значительно более щелочных.

Не повторяя подробно материалы по распространению в геологическом разрезе пород разного состава, что частично сделано ранее [4–6], следует отметить, что в разрезах архея преобладают известняки (ныне мраморы и кальцифиры), имеются сидериты в железисто-кремнистых рудах архея и начала протерозоя в интервале 2500–2300 млн лет (сидерий). После этого, т.е. во второй половине нижнего и особенно в среднем и верхнем протерозое,

преобладают доломиты и широко развиты магнезиты.

Преобладание карбонатов кальция и железа позволяет предполагать относительно кислые обстановки архея — начала протерозоя. Это, в свою очередь, обуславливает своеобразие геологических процессов того времени, в частности характера континентального выветривания.

Видимо, в условиях кислых сред на относительно стабильных участках платформ происходило химическое разложение пород суши. При этом, как и в позднейшие времена, магматические породы основного состава обеспечивали поставку в раствор кремнезёма и железа, которые миграционноспособны именно в кислых и восстановительных средах. Восстановительные обстановки в это время действительно существовали, свидетельством чему являются, например, данные по минеральному составу россыпей золото-уранового месторождения Витватерсранд, где среди обломочных компонентов встречаются пирит и уранинит, минералы, которые могли сохраниться и не разрушаться при переносе только при отсутствии кислорода в восстановительной обстановке.

Какова была роль биоты в этом древнем разложении основных и ультраосновных магматических пород, трудно оценить. Скорее всего, она была не очень значительной. Дело в том, что при отсутствии в атмосфере кислорода и соответственно озонового защитного экрана, жёсткое ультрафиолетовое излучение, вероятно, практически исключало возможность наличия на земной поверхности в чистом виде субаэральной жизни. Примитивная биота могла присутствовать в наземных озёрах и, возможно, внутри механически раздробленных дезинтегрированных магматических массивов (своеобразной почвы, отнюдь не аналогичной почве как совре-

*Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет)  
им. И.М. Губкина*

*E-mail:* [vgkuz@yandex.ru](mailto:vgkuz@yandex.ru)

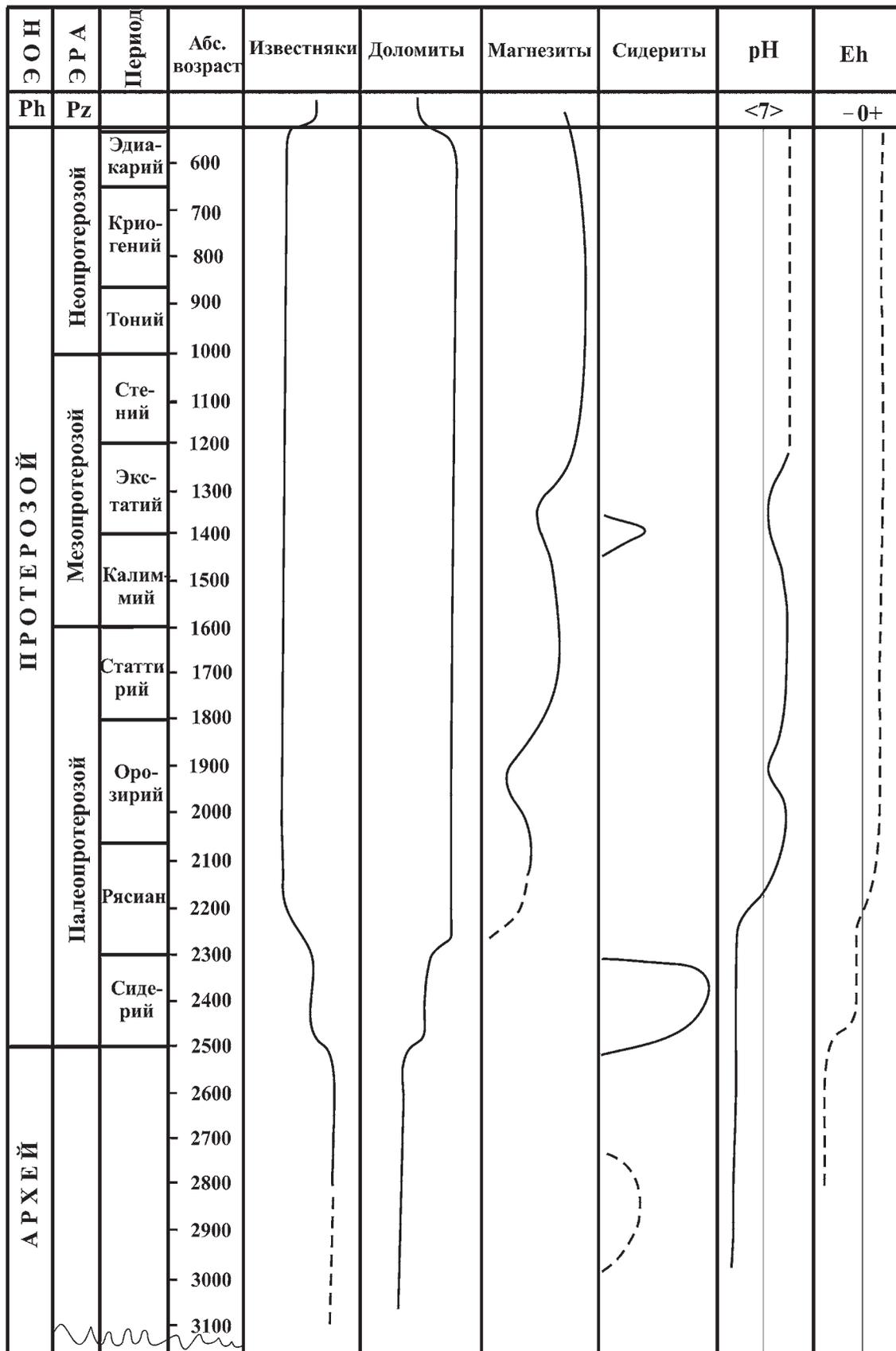


Рис. 1. Схема распределения в разрезе архея и протерозоя карбонатных пород разного состава и изменение кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных обстановок этого времени.

менной, так и фанерозойской). Но эффективность воздействия такой биоты, если она присутствовала, на коренные породы вряд ли была существенной. Основная роль преобразования исходных пород, скорее всего, принадлежала атмосферным агентам, той же углекислоте, а, возможно, и другим кислым дымам. Другими словами, выветривание как процесс разложения коренных пород было абиогенным чисто или преобладающе химическим.

В качестве остаточных, обеднённых кремнезёмом продуктов на континентах могут быть появившиеся уже в архее и раннем протерозое кварцевые песчаники. Другие подобные остаточные продукты, обогащённые оксидами алюминия — это широко распространённые в докембрии высокоглинозёмистые сланцы высоких степеней метаморфизма с минералами группы шпинели, кристаллические сланцы, дистеновые и силлиманитовые гнейсы. Вообще, проблемы стратиграфических, пространственных и генетических взаимоотношений подобных образований с железистыми кварцитами — отдельная и специальная задача. В качестве более конкретного примера можно указать глинистые алюминиевые сланцы с диаспором гамахаанской осадочной толщи супергруппы Трансвааль, которая включает и железорудную формацию Курумар в Южной Африке.

Следующий вопрос — непосредственные механизмы осаждения поступающего в океан материала. Скорее всего, наземные растворы были по сравнению с морской водой более кислыми, и при их смешении, привнесённые в океан кремнезём и железо выпадали в осадок. Подобный чисто химический способ осаждения считается обычно если не единственным, то, по крайней мере, абсолютно преобладающим. Не исключено, однако, что в океане под слоем воды УФ-излучение было уже не столь мощным, здесь существовала жизнь и она хотя бы определённым образом способствовала осаждению железа.

Подобное предположение подкрепляется существенной фактической базой.

Дело в том, что практически во всех железорудных формациях обнаружены в том или ином количестве остатки бактериальной биоты.

К примеру, в железистых кварцитах Лебединского месторождения КМА установлен биогенный магнетит, который являлся непосредственно первичным минералом [1]. Следы жизнедеятельности подробно описаны как в виде остатков железобактерий рода *Marioprofundus* в форме спирально закрученных железистых стебельков, других, менее определённых форм, так и в виде биомаркеров [2]. Вообще, наличие цианобактерий как в виде минерализованных

остатков, так и в виде биомаркеров, соответствующих изотопных соотношений и др., показано в ряде работ, где одновременно обсуждается роль и значение бактерий в осаждении и диагенетическом преобразовании полосчатых железных руд как геологами, так и микробиологами ([1, 2, 3, 8–14] и др.).

Это позволяет предполагать и другие способы осаждения рудного вещества, т.е. говорить не только о хемогенном, но и о биогехемогенном и даже биогенном способах его образования. При этом могли реализовываться два в общем независимых процесса. Во-первых, в анаэробных условиях в слабо кислых средах осаждались карбонаты железа. Во-вторых, не исключено также, что само образование сидерита определённым образом связано с влиянием бактерий. Так, экспериментально показано, что термофильные железоредуцирующие бактерии при высоком парциальном давлении углекислоты и недостатке гидроокиси железа образуют сидерит [3].

Второй вопрос, в проблеме образования железисто-кремнистых формаций — наличие как восстановленных, так и окисных форм рудных минералов. Во-первых, показано, что диссимилиаторными бактериями биогенно генерируется непосредственно магнетит [3]. Во-вторых, не исключено, также, что в более мелководных обстановках в фотической зоне могли обитать фототрофные железooksисляющие прокариоты, которые осаждали железо непосредственно в окисной, но без гидроксильной группы, форме.

В этом случае можно предполагать наличие относительно расчленённого по глубине водоёма, что подтверждается геологическими данными. Так, согласно Д. Самнеру, более мелководные условия свойственны формированию окисных руд по сравнению с таковыми для карбонатных [13]. Аналогично окисно-карбонатно-силикатные тонкослоистые отложения в формации Троммалд Северной Америки более глубоководны по сравнению с толстослоистыми окисно-силикатными [7].

В более мелководных условиях при наличии солнечного света существовала подобная бактериальная биота и формировались первично окисные формы в виде магнетита-гематита. Возможно и преобразование изначально восстановленных форм железа в окисные, поскольку показано, что в фотической зоне автотрофные железобактерии, в частности *Thiobacillum ferrooxidans* или *Gallionella ferruginea* в кислой среде окисляют закисные формы в окисные [14].

В более глубоких, афотических, образовывались и осаждались сидериты.

В среднем и позднем протерозое геохимическая обстановка кардинально менялась и это, видимо, было связано с развитием организмов и более конкретно — цианобактерий.

Появление и взрывной характер развития фототрофных цианобактерий в начале протерозоя, утилизация ими углекислого газа и генерация кислорода кардинально изменили глобальную геохимическую обстановку, которая стала щелочной, что и обусловило накопление карбонатов существенно магнезиального состава. Одновременно это вызвало окисление железа в определённых фациях раннепротерозойских бассейнов — самое великое окислительное событие, а после исчерпания резервов двухвалентного железа, и само появление свободного кислорода.

Само это изменение геохимических обстановок произошло достаточно быстро, что, в частности, фиксируется сменой железистых кварцитов основания протерозоя, образовавшихся в интервале 2300–2500 млн лет, магнетитами Памира и Восточных Саян.

Таким образом, именно появление и массовое развитие цианобактерий обусловило, во-первых, изменение глобальной геохимической обстановки с кислой восстановительной в архее, на щелочную окислительную в протерозое. Важным рубежом этого глобального переворота было начало протерозоя — сидерий. Важным следствием подобного переворота было изменение характера седиментации, смена типов пород, во многом самих процессов породообразования, в частности характера континентального выветривания. В архее—раннем протерозое это преимущественно, если не исключительно чисто химическое углекислородное разложение силикатов. В конце девона—начале карбона в связи появлением наземной растительности в прибрежных участках биогенное по сути разложение алюмосиликатов привело к образованию тонштейнов и каолинистых глин в целом. В конце мела—кайнозоя с появлением тропических лесов с их огромной биологической продуктивностью, начало формироваться уже латеритное выветривание.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бортников Н.С., Новиков В.М., Боева Н.М., Жухлистов А.П., Жегалло Е.А., Соболева С.В. Биогенный наномангнетит в Лебединском месторождении: свидетельства биохимических процессов в образовании железистых кварцитов Курской магнитной аномалии // ДАН 2017. Т. 477. № 2. С. 211–215.
2. Дубинина Г.А., Сорокина А.Ю. Нейтрофильные литотрофные железозакисляющие прокариоты и их участие в биогеохимических процессах железа // Микробиология. 2014. Т. 83. № 2. С. 127–142.
3. Заварзина Д.Г. Образование магнетита и сидерита термофильными железоредуцирующими бактериями // Палеонтологический журнал. 2004. № 6. С. 3–8.
4. Кузнецов В.Г. О возможном влиянии биоса на эволюцию доломитообразования в истории Земли // ДАН. 2001. Т. 378. № 3. С. 366–369.
5. Кузнецов В.Г. Эволюция карбонатонакопления в истории Земли. М.: ГЕОС, 2003. 262 с.
6. Кузнецов В.Г. Связь эволюции цианофитов и стратиграфического размещения магнетитов // Геология и разведка. 2004. № 4. С. 30–36.
7. Холодов В.Н. Эволюция кремненакопления в истории Земли // Происхождение и практическое использование кремнистых пород. М.: Наука, 1987. С. 6–43.
8. Kappler A., Newman D.K. Formation of Fe (III) Minerals by Fe (II) Oxidizing Photoautotrophic Bacteria // Geochim. Cosmochim. Acta. 2004. V. 68. № 6. P. 1217–1226.
9. Kappler A., Pasquero C., Konhauser K.O. Deposition of Banded Iron Formations by Anoxic Phototrophic Fe(II) – Oxidizing Bacteria // Geology. 2005. V. 33. № 11. P. 865–868.
10. Konhauser K.O., Hamade T., Raiswell R., Morris R.C., Ferris P.C., Southam G., Ganfield D.E. Could Bacteria Have Formed the Precambrian Banded Iron Formations? // Geology. 2002, V. 30. № 12. P. 1079–1082.
11. Miot J., Bencerara K. Morin G., Kappler A., Bernard S., Obst M., Scouri-Panet F., Guigner J.-M., Posth N., Galvez M., Broun G.E., Guyot F. Iron Biomineralization by Anaerobic Neutrophic Iron-Oxidizing Bacteria // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2009. № 3. V. 73. P. 696–711.
12. Posch N.R., Konhauser K.O., Kappler A. Microbiological Processes in Banded Iron Formation Deposition // Sedimentology, 2013, V. 60. № 7 P. 1733 – 1744.
13. Sumner D.Y. Carbonate Precipitation and Oxygen Stratification in Late Archean Seawater as Deduced from Facies and Stratigraphy of the Gamohaanan and Frisco Formations, Transvaal Supergroup, South Africa // Amer. J. Science. 1997. V. 297. № 5. P. 455–487.
14. Widdel F., Schnell S., Heising S., Ehrenreich A., Assmus B., Schink B. Ferrous Iron Oxidation by Anoxic Phototrophic Bacteria // Nature. 1993. V. 362. № 6423. P. 834–836.

**GEOCHEMICAL ENVIRONMENTS OF THE ARCHEAN-PROTEROZOIC****V. G. Kuznetsov***Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS A.N. Dmitrievskii April 12, 2018

Received May 3, 2018

In the Precambrian section, there is a change of Archean calcite carbonate rocks to magnesia and ferrous in the Proterozoic. This is correlated with the massive development of cyanobacteria, the absorption of which carbon dioxide and the generation of oxygen, led to a change in the acidic reduction conditions of Archaean alkaline oxidizing in the Proterozoic.

*Keywords:* Archean, Proterozoic, carbonate rocks, acidic-alkaline conditions.