

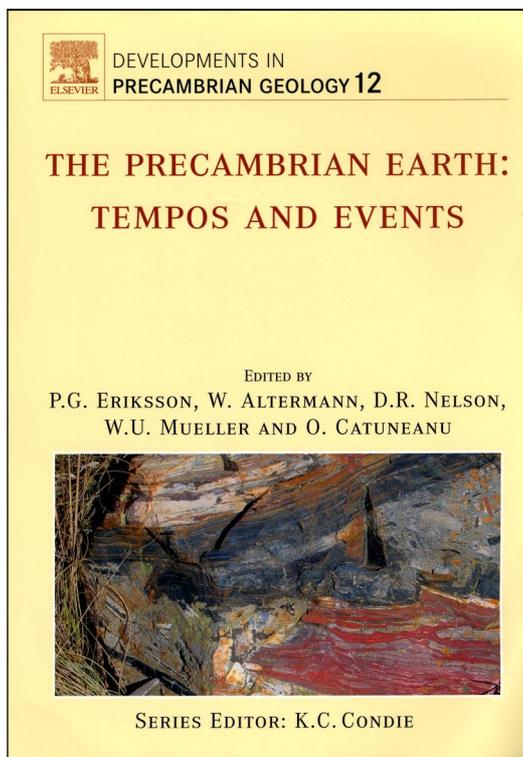
В МИРЕ КНИГ
IN THE BOOK WORLD

НОВАЯ МОНОГРАФИЯ ИЗ СЕРИИ «DEVELOPMENTS IN PRECAMBRIAN GEOLOGY»¹

В конце 2004 г. издательство Эльзевир в серии монографий «Developments in Precambrian Geology», главным редактором которой является известный американский геолог Кент Конди, выпустило очередной, 12 том, основной темой которого явился анализ эволюции нашей планеты в докембрии. В первой главе этой книги проанализированы самые ранние этапы формирования Земли и процессы, приведшие к появлению ядра, мантии, коры и примитивной атмосферы. Во второй и третьей главах обсуждаются механизмы формирования континентальной коры с особым акцентом на историю гранитно-зеленокаменных областей и особенности взаимодействия в докембрии тектонических процессов и мантийных плюмов. Четвертая глава посвящена процессам архейского вулканизма. Три следующие дают картину эволюции атмо- и гидросферы, на фоне которой возникает и развивается жизнь, меняются режимы седиментации и типы осадочных бассейнов. Наконец, в последней, восьмой, главе обсуждаются особенности применения концепции сиквенс-стратиграфии к докембрийской осадочной летописи.

Так как в краткой журнальной заметке невозможно даже сжато пересказать содержание этой почти 950-страничной книги, попытаюсь остановиться только на ряде наиболее общих представлений зарубежных исследователей о том, как понимается ими сегодня докембрийская эволюция Земли.

Самые ранние этапы эволюции нашей планеты. Реконструкция самых первых геологических событий в истории Земли основана главным образом на изучении наиболее древних пород, возраст которых составляет порядка 4030 млн. лет, и на моделировании особенностей дифференциации химических резервуаров. Современные данные позволяют предпо-



лагать, что между вспышкой сверхновой, крупномасштабной аккрецией протопланетных дисков и появлением раннего Солнца прошло всего несколько миллионов лет. Затем на протяжении примерно 100 млн. лет столкновения небольших планетозималей и формирование более крупных протопланетных тел продолжались. Эти процессы сопровождались, по всей видимости, крупномасштабным плавлением и дифференциацией силикатных компонентов крупных планетозималей. Датирование метеоритов показывает, что планетозимали с размерами 10-100 км испытали внутреннюю магматическую дифференциацию менее чем за 10 млн. лет после взрыва сверхновой. Re-Os систематика по железным метеоритам свиде-

¹ The Precambrian Earth: Tempos and Events / P.G. Eriksson, W. Altermann, D.R. Nelson, W.U. Mueller, O. Catuneanu (eds). Developments in Precambrian Geology. V. 12. (K.C. Condie, series ed.). Amsterdam-Boston-Tokyo: Elsevier, 2004. 941 p.

тельствует также, что образование металлических ядер протопланет произошло примерно через 50 млн. лет после образования Солнечной системы; Hf-W систематика отводит на этот процесс около 35 млн. лет. Поразительно, но по мнению ряда авторов, существуют свидетельства того, что гидротермальные процессы имели место на планетозималях уже через 2 млн. лет (! – А.М.) после образования Солнечной системы.

Предполагается также, что падение примерно 4550-4540 млн. лет назад (т.е. через 25-35 млн. лет после формирования Солнечной системы) на прото-Землю планетного эмбриона, размер которого был сопоставим с Марсом, привело к внезапному плавлению по крайней мере одного полушария планеты, а также изостатической перестройке оставшейся ее части. Протоатмосфера Земли во время указанного события оказалась в значительной мере уничтожена. Однако часть ее компонентов могла быть захвачена магматическим океаном. Длительность существования последнего оценивается зарубежными авторами в несколько сотен миллионов лет. Импактные события и ряд других процессов способствовали его постепенной дегазации.

Ранняя земная кора имела коматиитовый и/или высоко-Mg базальтовый состав и, по всей видимости, подверглась многократному рециклированию за счет хаотической конвекции. Механизмы рециклирования все еще активно обсуждаются специалистами.

Представления о механизмах и скоростях формирования ранней континентальной коры также дискуссионны. Здесь все еще почти с равными шансами на успех существует ряд точек зрения. Так, одни авторы считают, что начиная с раннего архея имел место эпизодический рост коры, другие, напротив, предполагают, что большая часть коры была генерирована ранее 3 млрд. лет, но затем подверглась рециклингу в мантии. Наиболее крупный пик глобального роста континентальной коры, по современным представлениям, пришелся на 2.7 млрд. лет. С ним была связана также термальная переработка коры на всех континентах. Меньшие по масштабу (региональные) пики имели место 2.5, 2.1 и 1.9-1.8 млрд. лет назад. Все вместе это позволяет предполагать, что в докембрийской истории Земли, как и в последующие эпохи, существовали тектонически активные и пассивные периоды.

Зеленокаменные пояса. Возможность прямых сопоставлений геодинамики архейских зеленокаменных поясов с геодинамикой хорошо знакомых нам фанерозойских островодужных систем и другими моделями, как и многие вопросы докембрийской геологии, также достаточно дискуссионны. Здесь, как следует из приведенных в монографии материалов, две альтернативы – плюм- и плейт-тектоника.

Считается, что формирование громадных объемов коматиитов и толеитовых базальтов в архейских зеленокаменных поясах было связано, скорее всего, с доминировавшими в это время процессами мантийного диапиризма. Однако, как выясняется в последнее время, крупнейший в мире зеленокаменный пояс Абитибии с возрастом 2735-2670 млн. лет обнаруживает достаточно убедительные доказательства эволюции, описываемой терминами островодужных и коллизионных процессов, сходных с теми, что мы видим в фанерозое, так как входящие в состав этого пояса комплексы пород в заметной степени сходны с фанерозойскими бонинитовыми ассоциациями и островодужными пикритами. Таким образом, если исходить из фанерозойских геодинамических интерпретаций геохимических характеристик магматических пород, то можно сделать вывод о том, что процессы плейт-тектоники функционировали уже в архее. Вместе с тем, проведенные недавно Дж. Мейерсом полевые исследования в зеленокаменном поясе Исуа позволяют предполагать, что интерпретация его как наиболее древнего интраокеанического аккреционного комплекса, скорее всего ошибочна. В целом же вулканы архейских зеленокаменных поясов имеют значительные отличия состава от более поздних аналогов, что указывает, по всей видимости, на различия в составе источников расплавов, процессах плавления и тектонических обстановках на ранней и современной Земле.

Образованию значительных объемов тоналит-трондьемит-гранитных расплавов способствовали и повышенные (примерно в 2-6 раз выше современного) тепловые потоки архея, а также наличие океанической коры, аналогичной коре фанерозойских океанических плато. Считается, что формирование ТТГ-ассоциаций могло происходить либо за счет субдукции на небольшие глубины мощной и горячей океанической литосферы, либо вследствие *in situ* дифференциации и деламинации континентальной коры.

Предполагается, что в архее-палеопротерозое преобладали процессы пологой субдукции; в мезопротерозое пологая субдукция сменилась более крутой и генерация коматиитовых магм прекратилась. Развитие процессов плейт-тектоники, в том числе и увеличение глубины проникновения слэбов в мантию, способствовало появлению суперплюмов. Крупнейшие суперплюмовые события тесно связаны и с суперконтинентальными циклами, будучи приурочены в основном к их концу. Показательно также, что эти события, имевшие место 2.7 и 1.9 млрд. лет назад, сопровождались глобальными поднятиями уровня океана и значительными изменениями его химического состава. Распад Родинии около 750 млн. лет назад также был связан с термальной аномалией в коре, обусловленной воздействием на нее суперплюма.

Достаточно отчетливо выражена в докембрии эволюция процессов вулканизма. Так, в разрезах архейских островодужных ассоциаций практически отсутствуют орогенные андезиты, что было обусловлено более горячим состоянием Земли и доминированием процессов пологой субдукции горячей океанической коры. Протерозойские островодужные ассоциации содержат более высокую долю вулканокластических пород. В палеопротерозойских зеленокаменных поясах длительность вулканических циклов составляла порядка 30-95 млн. лет. В аналогичных структурах неопротерозоя вулканические циклы увеличились до почти 200 млн. лет. На этом же этапе впервые отчетливо фиксируются три ключевых элемента современной плейт-тектоники: 1) тектонически совмещенные с деформированными и аккрецированными островодужными последовательностями офиолиты; 2) меланжи; и 3) голубосланцевый метаморфизм.

Обратимся теперь к проблемам *экзогенной геологии докембрия*. Закономерности эволюции гидро- и атмосферы на докембрийском этапе также в значительной мере дискуссионны. Парадоксально, но в настоящее время одна и та же совокупность геологических, палеонтологических и биогеохимических данных

интерпретируется в рамках двух взаимоисключающих моделей (рис. 1).

Согласно одной из них, получившей по первым буквам фамилий ее авторов (Cloud, Walker, Holland, Kasting) название «С-В-Н-К»-модель, зарождение жизни имело место 3.0 или 2.8 млрд. лет назад в условиях восстановительной атмосферы и содержания CO_2 порядка 300 PAL. Вплоть до рубежа 2.2 млрд. лет биогенный метан и CO_2 препятствовали попаданию на поверхность планеты лучей «тусклого молодого Солнца». Около 2.0 млрд. лет назад произошло стремительное увеличение содержания O_2 в атмосфере, приведшее в том числе и к появлению эукариот. В рамках этой модели предполагается также, что ниже фотической зоны в океанах вплоть до 600 млн. лет назад существовали аноксические условия. Содержание в океанах SO_4^{2-} до ~ 2.2 млрд. лет назад было весьма низким (исключением являлись только отдельные эвапоритовые бассейны). В дальнейшем, вплоть до ~ 800 млн. лет назад, происходило постепенное увеличение концентрации SO_4^{2-} , после чего имел место скачкообразный рост содержания SO_4^{2-} почти до современных значений. Считается также, что ранее 1.8 млрд. лет в океанах существовали высокие концентрации Fe^{2+} и низкие концентрации H_2S ; это соотношение изменилось между 1.8 и 0.8 млрд. лет назад.

Модель «D-O» (авторы – Dimroth и Ohmoto) постулирует появление процессов фотосинтеза и, возможно, цианобактерий примерно 4 млрд. лет назад (хотя реально первые цианобактерии фиксируются только в породах неархея). Вслед за этим последовал рост концентрации O_2 в атмосфере от $< 10^3$ до ~ 1 PAL. Базовыми положениями модели «D-O» являются также представления о низких содержаниях CH_4 , CO_2 , Fe^{2+} и H_2S в хорошо аэрированных океанах с практически постоянной величиной SO_4^{2-} после 4 млрд. лет².

Известно, что на протяжении достаточно длительного времени многие зарубежные и отечественные исследователи считали, что такой специфически докембрийский тип отложе-

² Собственно геологические следствия из этих моделей достаточно ясны. Высокое содержание парниковых газов в ранней атмосфере, согласно «С-В-Н-К»-модели, вместе с более высоким тепловым потоком и кислыми поверхностными водами вело к существенно более агрессивному, чем в последующие эпохи, преобразованию пород на дневной поверхности. Однако этому в лишенных наземной растительности докембрийских обстановках могли препятствовать высокие скорости эрозии, короткие пути миграции кластики и низкая устойчивость продуктов выветривания к размыву.

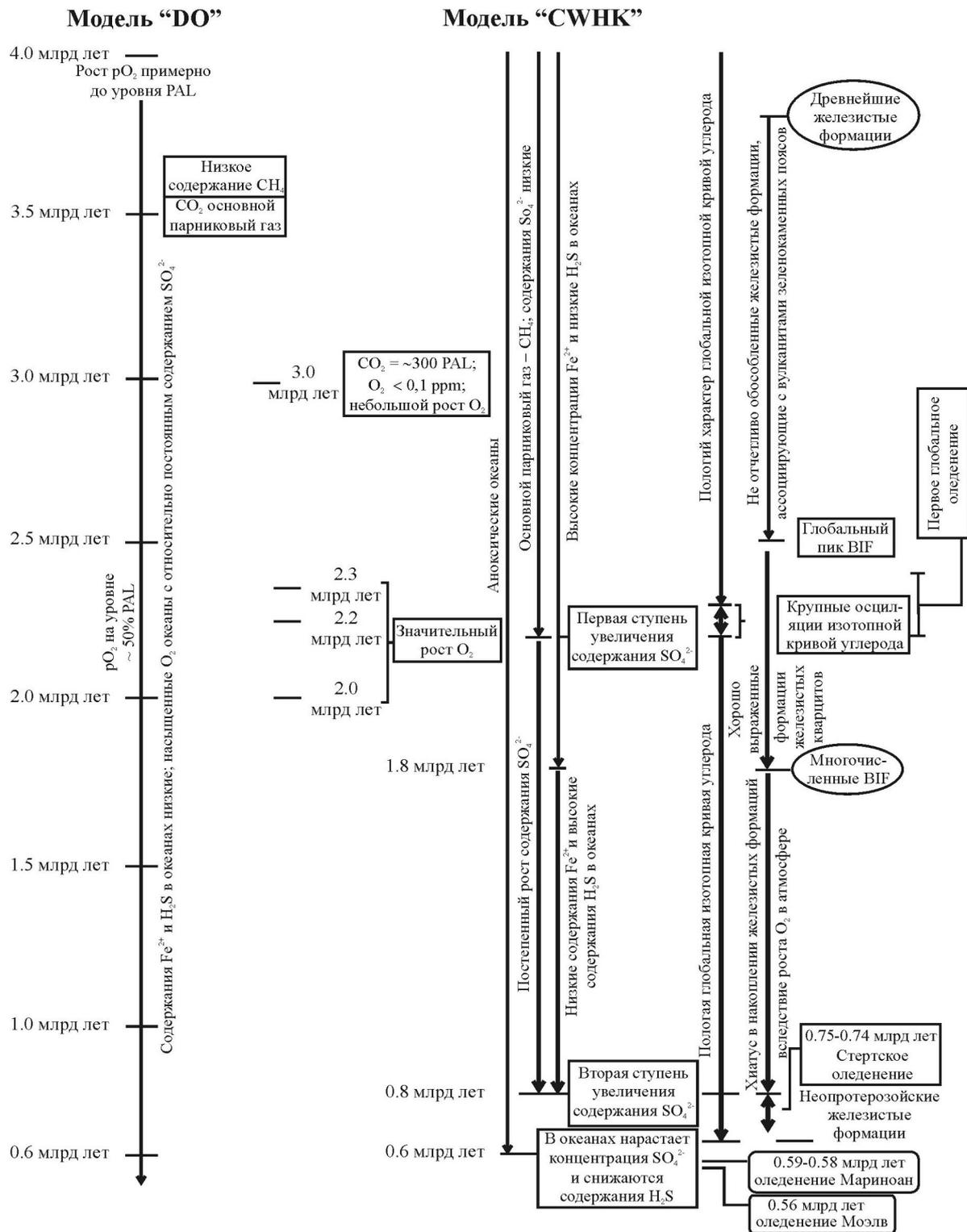


Рис. 1. Эволюция атмосферы, океанов и климата на докембрийском этапе развития Земли. BIF – формации полосчатых кварцитов, PAL – современный атмосферный уровень.

ний как железистые формации (IF) могут дать ценную информацию об эволюции процессов осадконакопления и составе атмо- и гидросфе-

ры. Наиболее древние из них (~ 3.8 млрд. лет) ассоциируют с вулканитами зеленокаменных поясов. Глобальный пик развития IF зафикси-

рован примерно 2.5 млрд. лет назад. Многочисленные IF известны среди отложений с возрастом около 1.8 млрд. лет; после длительного перерыва они появляются также в отложениях неопротерозоя. Данные последних лет показывают, что архейская морская вода могла быть обогащена фумарольным Fe только ниже пинноклина. Возможно также, что в архее существовали Fe- и Eh-стратифицированные океаны, и обогащенные железом глубинные их воды поступали на мелководные шельфы, где пинноклин располагался непосредственно над дном. В рамках такого подхода IF не могут быть использованы для суждений о концентрациях O_2 в атмосфере, так как формирование их происходило без непосредственного влияния последней.

Вариации изотопного состава углерода в докембрии рассмотрены в монографии на материалах по карбонатным породам австралийских бассейнов. В неоархее и раннем палеопротерозое кривая $\delta^{13}C_{carb}$ имеет, по данным Дж. Линдсея и М. Бразье, весьма пологую форму. Примерно на отметках 2.2-2.3 и ~ 0.65 млрд. лет назад на ней фиксируются два хорошо выраженных пика, также разделенные достаточно пологим участком. Предполагается, что эти особенности изотопной кривой углерода отражают скорее влияние плейт-тектонических событий и суперконтинентальную цикличность, а не изменение состава атмосферы (пологие участки кривой $\delta^{13}C_{carb}$ коррелируют в таком случае с эпохами низкой тектонической активности). Значительная положительная экскурсия $\delta^{13}C_{carb}$, присутствующая в отложениях с возрастом ~2.2-2.3 млрд лет, предположительно связана с эпохой крупномасштабного захоронения C_{org} и параллельного возрастания O_2 в атмосфере.

Весьма специфическим этапом развития Земли представляется авторам монографии палеопротерозой, на который приходятся первые крупные экскурсии $\delta^{13}C_{carb}$, накопление колоссальных масс железистых кварцитов и первые глобальные оледенения (~ 2.4-2.2 млрд. лет назад). Продукты последних локализованы в разрезах пассивных окраин и форландовых бассейнов и не имеют временной связи ни с IF, ни с венчающими доломитами, что разительно отличает их от подобных, но более широко распространенных образований в разрезах неопротерозоя. Исходя из сказанного Г. Янгу, Г. Уильямсу и Х. Фриммелю представляется, что ги-

потеза «snow-ball Earth» к палеопротерозойским оледенениям малоприменима. Вообще, как это следует из приведенных в рассматриваемой работе материалов, понимание механизмов крупных климатических пертурбаций и особенностей формирования гляциогоризонтов еще впереди. Считается, что значительную роль в этом может сыграть выяснение связи оледенений с суперконтинентальными циклами.

Г. Уильямсом вновь акцентировано внимание на докембрийских приливных ритмиках. Исходя из анализа данных по Южной Австралии, им сделан вывод, что ~ 600 и 750 млн. лет назад длительность земных суток составляла, соответственно, 21.9 и 21.4 часов. Это указывает на отсутствие (! – А.М.) существенного расширения Земли, по крайней мере с позднего неопротерозоя.

Докембрийская жизнь. Предполагается, что в доархее и раннем архее поверхность нашей планеты подверглась воздействию до 6 катастрофических (полностью стерилизующих ее поверхность) импактных событий. Исходя из этого, даже в отсутствие каких-либо достоверных фактов, можно считать, что она зародилась в весьма экстремальных обстановках около 3.5 млрд. лет тому назад (рис. 2).

Ограниченность в целом докембрийской геологической летописи делает затруднительной оценку скорости колонизации различных обстановок, но присутствие микрофоссилий в породах зеленокаменных поясов Барбертон и Пилбара указывает, возможно, что уже в раннем архее имело место широкое распространение жизни в мелководных и интертайдиальных обстановках, а возможно и в субаэральных условиях. Во то же время, по мнению Л. Алтерманна, появление микрофоссилий не предвлялось каким-либо явным био-геохимическим событием.

Важную роль в протерозое играла стабилизация силикокластических осадков микробными матами, хотя первые примеры ее известны в отложениях неоархее. Весьма примечательна также наблюдающаяся в отложениях архее тесная ассоциация между микробными матами и продуктами гидротермальной деятельности.

Наиболее древние строматолиты, характеризовавшиеся небольшими размерами и ограниченной латеральной протяженностью, имеют возраст ~ 3.5 млрд. лет и найдены в отложениях серии Варравуна на кратоне Пилбара.

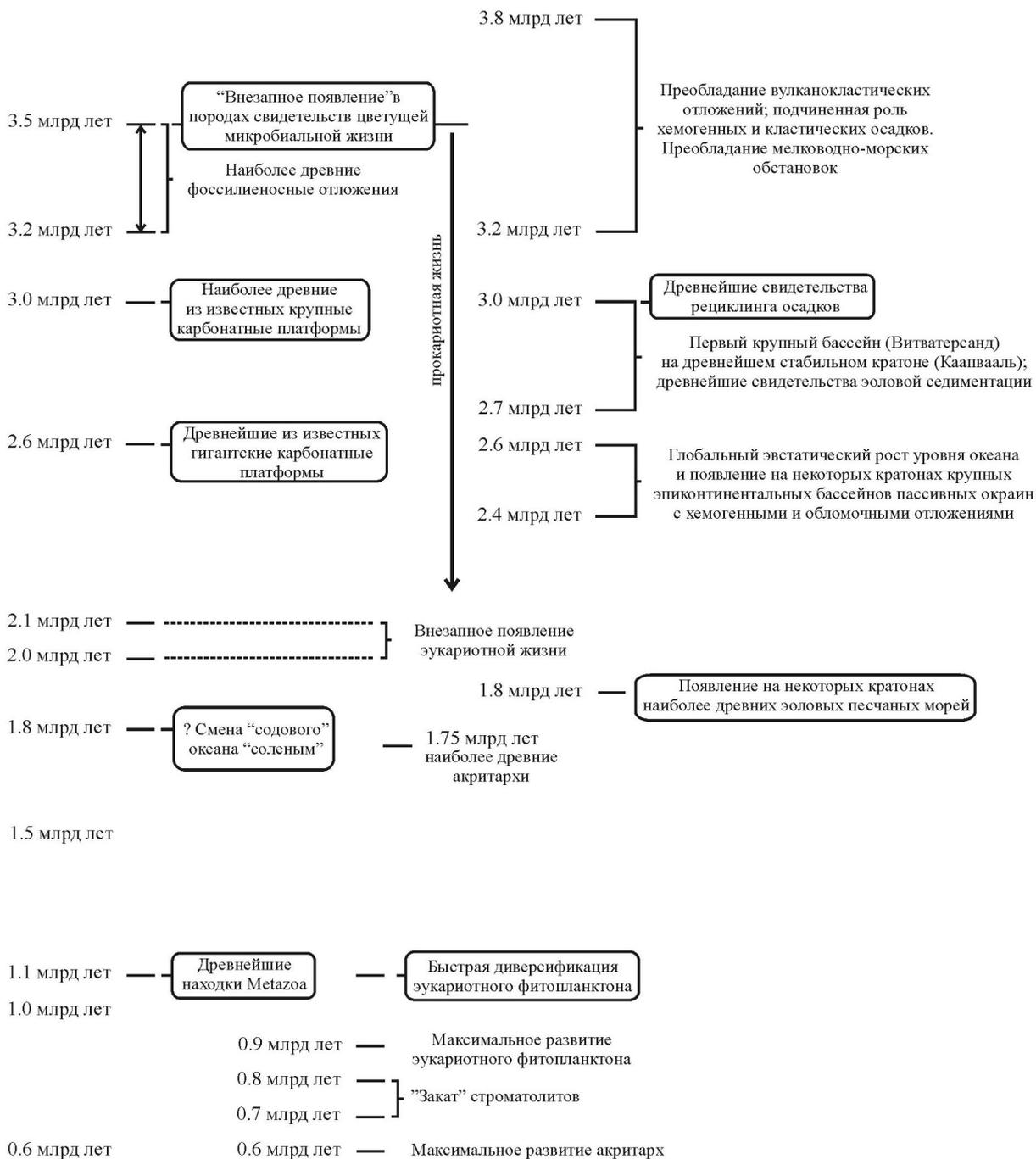


Рис. 2. Био-геологическая эволюция и характер изменения седиментационных систем в докембрии.

Примерно 3.0 млрд. лет назад появляются более крупные карбонатные платформенные постройки, оказывавшие некоторое влияние на локальную архитектуру седиментационных бассейнов. Большинство зарубежных авторов считает, что наличие стабильных тектонических областей, связанных с ранними протоконтинентальными структурами могло быть более

важным фактором эволюции этих карбонатных платформ, нежели видовой состав организмов. Однако, когда после 2.6 млрд. лет в бассейнах на кратонах Каапвааль и Пилбара появились гигантские карбонатные платформы, процессы их формирования контролировали уже биогенные факторы, а скорости осадконакопления в подобных обстановках были сопоставимы с

теми, что характерны для современных карбонатных платформ. Структурно-текстурное и минералогическое сходство докембрийских и современных карбонатных пород позволяет предполагать, что они являются продуктами очень сходных микробиологических и карбонатформирующих процессов.

В целом в докембрийской летописи доминировали прокариоты (бактерии и цианобактерии), многие из которых имеют заметное биологическое сходство с современными таксонами. Внезапное появление в протерозое эукариот после почти 1500 млн. лет господства прокариот имеет примерно ту же значимость, как и внезапное появление последних примерно 3.5 млрд. лет назад. Хотя крупные спиралевидные фоссилии *Grypania*, найденные в железистых кварцитах Мичигана с возрастом 2.1 млрд. лет, были отнесены, на основании главным образом их морфометрических особенностей, к эукариотным водорослям³, крупные коккоидные микрофоссилии, обычно рассматриваемые как эукариоты, появляются в большом количестве только в мезопротерозойских отложениях. На рубеже 1.1 млрд лет произошла быстрая диверсификация эукариотного фитопланктона, а максимального разнообразия акритархи достигли после варангерского оледенения, в отложениях моложе 600 млн. лет. Около 800-700 млн. лет назад заметно сократилась роль строматолитов в карбонатных последовательностях, что, как полагают многие, было связано со снижением содержания в атмосфере CO₂, ростом концентрации O₂ и гляциальными процессами.

Хорошо выражена на протяжении докембрия и эволюция химического состава океанов. Считается, что смена «содовых» океанов «галитовыми» произошла примерно 1.8 млрд. лет назад. Ряд авторов однако предполагает, что бикарбонаты доминировали в океанах примерно до 1.0 млрд. лет назад.

Сиквенс-стратиграфия. При построении сиквенс-стратиграфических моделей фанерозойских бассейнов обычно предполагается, что накопление осадочных образований в них

контролируется в первую очередь изменениями уровня моря и базиса осадконакопления. Однако реально формирование осадочного выполнения бассейнов зависит от широкого спектра факторов. Так, к факторам первого порядка относятся общие особенности образования континентальной коры, вариации скорости ее роста, взаимодействие процессов плейт-тектоники и мантийных плюмов. Множество других факторов (палеоклиматические, биологические, седиментологические и т.д.) также оказывает влияние на строение осадочных последовательностей, контролируя, например, стратиграфическую цикличность и другие особенности их строения. В связи с этим, использование сиквенс-стратиграфического анализа по мере увеличения возраста отложений становится все более затруднительным и примеры успешного использования основанных на данном подходе моделей к докембрийским последовательностям все еще достаточно редки.

Итак, мы перелистали все 950 страниц новой капитальной монографии по докембрию... Надо признать, что многое из приведенного в ней уже знакомо нам по публикациям в ведущих зарубежных геологических журналах, как обычно практически не представлен материал по отечественным докембрийским объектам, существенное внимание уделено магматическим и метаморфическим ассоциациям, тогда как осадочные последовательности затронуты не столь весомо, впрочем, это прямо связано с явно видимым в книге креном в сторону раннедокембрийских образований, очень мало новых данных по мезо-неопротерозойскому (рифейско-вендскому) интервалу, но тем не менее... отечественных изданий по данной тематике, охватывающих столь широкий круг вопросов и столь детально раскрывающих их на конкретных примерах с прекрасными иллюстрациями пока нет и, следовательно, нам остается две возможности – внимательно познакомиться с названной книгой и продолжать накапливать свой материал, который рано или поздно, но будет представлен столь же масштабно.

А.В. Маслов

³ Если это предположение корректно, то разделение филогенетического древа на прокариоты и эукариоты должно было произойти задолго до 2.1 млрд. лет. Чапмен и Шопф (Chapman, Schopf, 1983) считают, что собственно аэробные эукариоты появились при достижении кислородом уровня примерно 1-2 % от PAL, а это свидетельствует в пользу предположений о раннем существовании атмосферного кислорода (модель «D-O»).