

РАЗВИТИЕ ЗЕМЛИ В ДОКЕМБРИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ. ПРОТЕРОЗОЙ

Аннотация. Рассматриваются вопросы современных представлений развития Земли в докембрии (катархей и архей). Приводятся Международная стратиграфическая шкала и стратиграфическая шкала России. Подтверждается непрерывное движение и круговорот вещества мантии, лежащие в основе теории тектоники литосферных плит.

Ключевые слова: тектоника, докембрий, катархей, архей, современные представления, теория литосферных плит.

Summary. The issues of modern concepts of the Earth's development in the Precambrian (Katarchean and Archean) are considered. The International Stratigraphic Scale and Stratigraphic Scale of Russia are given. The continuous movement and circulation of the mantle substance, which underlie the theory of lithospheric plate tectonics, is confirmed.

Key words: Tectonics, Precambrian, Katarchean, Archean, modern concepts, theory of lithospheric plates.

Палеопротерозой и мезопротерозой

В первой эре протерозойского зона — палеопротерозое — произошёл ряд событий, кардинально изменивших весь ход эволюции Земли, её геосфер и жизни.

В *сидерии* в основном завершилось окисление растворимых форм железа в Мировом океане (по этому процессу данный период и получил своё название от др.-греч. σίδηρος — железо) с образованием джеспилитов, начавшимся в неоархее, и кислород, который до этого практически полностью расходовался на их окисление, стал накапливаться в атмосфере. Момент времени, когда содержание кислорода в атмосфере достигло 1 % от современной концентрации (примерно в тысячу раз больше, чем в палео- и мезоархее), называется первой точкой Пастера (вторая точка Пастера наступит, когда содержание кислорода станет 10 % от современного, но это произойдёт в начале эдиакария). Увеличение концентрации кислорода, навсегда изменившее общий характер атмосферы с восстановительного на окислительный, получило название Великая кислородная катастрофа (около 2,45 млрд лет назад), или

кислородная революция, или великое кислородное событие (по глобальному масштабу вызванных им последствий). Начали окисляться горные породы суши, вследствие чего вся она приобрела ржаво-красный («марсианский») оттенок за счёт активизации процессов окисления и выветривания железосодержащих магматических пород. Динамика содержания кислорода в атмосфере Земли за время её геологической истории показана на рисунке 1.



Рисунок 1 — Оценки содержания кислорода в атмосфере [1]

Кислород стал активно окислять основную парниковый газ атмосферы — метан, превращая его в углекислый газ, эффективность которого как парникового газа гораздо ниже, и воду, вследствие чего содержание метана в атмосфере стало быстро уменьшаться. К тому же, кислород является сильным ядом для метанообразующих бактерий и ряда других микроорганизмов, которые стали массово вымирать (фактически, первое массовое вымирание организмов на Земле, первый биосферный экологический кризис, вызванный катастрофическим загрязнением окружающей среды отходами жизнедеятельности живших в то время организмов), выжили лишь те, кто успел создать механизм защиты от отвлекающего действия кислорода (специальные ферменты, толстые клеточные стенки и др.).

Всё это привело к тому, что метан практически исчез из атмосферы, перестав обеспечивать парниковый эффект. Наступило Гуронское оледенение, которое продолжалось около 300 млн лет (2,4–2,1 млрд лет назад) и завершившееся уже в следующем периоде палеопротерозоя — рясии, следы которого (тиллиты — грубообломочные сцементированные породы, возникшие при движении льда) найдены даже на территориях, располагавшихся в то время в районе экватора. Вследствие этого получила распространение гипотеза «Земли-снежка», предполагающая, что во время Гуронского оледенения и ряда оледенений в конце протерозоя Земля полностью покрывалась льдом.

Оледенение вызвало угнетение жизнедеятельности организмов, и выработка кислорода сократилась, кроме того, продолжающаяся вулканическая активность обеспечила поступление в атмосферу углекислого газа, концентрация которого в конце концов достигла величин, необходимых для возвращения парникового эффекта и окончания оледенения.

В этот период целый ряд микроорганизмов перешёл к окислительным реакциям на основе кислорода, что при-

вело к стремительному распространению кислородного дыхания. Аэробный метаболизм позволил живым организмам вырабатывать энергии примерно в 30–50 раз больше, чем вырабатывалось при анаэробном. Группа микробов, которая освоила получение энергии с помощью кислорода, называется протеобактериями. Согласно общепринятой сейчас теории, именно от них произошли дыхательные органеллы эукариотных клеток — митохондрии [2]. Да и появление самих эукариотических организмов стало возможным только после появления протеобактерий, то есть явилось прямым следствием Великой кислородной катастрофы. Протеобактериальная клетка вступила в симбиоз с клеткой археи, внедрившись в неё, породив своего рода химеру с новыми свойствами. Эта химера и стала эукариотной клеткой; молекулярные компоненты архейного и протеобактериального происхождения в ней сильно перемешались, разделив между собой функции [2]. Минимальная концентрация кислорода, необходимая для поддержания устойчивого метаболизма эукариотной клетки, составляет 5 % современного содержания [3]. Как раз на конец Гуронского оледенения приходится находки самых древних эукариотических многоклеточных водорослей. Таким образом, эволюция эукариотов от симбиоза с клетками предков митохондрий до появления ядра, цитоскелета, других специфических органелл и многоклеточности произошла чрезвычайно быстро по геологическим меркам. Первыми многоклеточными организмами были водоросли, растущие на мелководьях, тогда как основная часть океана была всё ещё бескислородной.

Кроме живых организмов коренному преобразованию подверглось разнообразие минералов — кислородная революция вызвала «минеральный взрыв» — резкое повышение количества появившихся на земле минералов. Из примерно 4500 минералов не менее 2/3 смогли образоваться только в кислородной атмосфере, то есть также благодаря кис-

лородной революции. Около 3000 ранее не существовавших в Солнечной системе минералов появились в период сидерия — рясия [4].

Переход в раннем палеопротерозое к тектонике современного типа с двухъярусной конвекцией в мантии радикально модифицировал такие важные эндогенные системы Земли, как магматизм и магматогенное рудообразование. Появились новые группы и семейства горных пород, стали проявляться принципиально новые рудообразующие процессы, существенно расширившие круг эндогенных полезных ископаемых в структурах коры. Начали формироваться полиметаллические месторождения, редких и благородных металлов и редких земель [5]. Поступающая вместе с веществом литосферы в зонах субдукции в мантию океаническая вода понижала температуру плавления мантии и низов коры, способствовала образованию расплавов с широким спектром составов, а также их обогащению металлами, редкими элементами и др. В конечном итоге благодаря процессам субдукции возникло большинство месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых [5].

Так, в *рясии* сформировался комплекс месторождений в Южной Африке, содержащий 90 % известных мировых запасов металлов платиновой группы, а также значительные запасы хромитов, касситеритов (минерал олова), минералов ванадия и титана. В других районах Земли образовались похожие интрузии.

В *орозии* Земля столкнулась с двумя крупными астероидами, сформировавшими крупнейшие на планете ударные кратеры — Вредефорт (ЮАР) и Садбери (Канада, район озера Онтарио), диаметром 300 и 250 км соответственно. Метеоритный удар в Садбери привёл к образованию тем медно-никелевого рудного бассейна.

В этом периоде происходило формирование суперконтинента Колумбия. Около 1,95 млрд. лет назад шло интенсивное формирование горных систем в районах коллизии (столкновений) от-

дельных участков континентальной коры друг с другом, по которому период получил своё название от др.-греч. ὄρος — гора, ζώνη — горная цепь. К границе орозии — статерия Колумбия уже сформировалась, но продолжала несколько увеличивать площадь за счёт аккреции на её краях [6]. Размеры Колумбии составляли 12,9 тыс. км с севера на юг и 4,8 тыс. км с запада на восток (рис. 2).

Со *статерия* — последнего периода палеопротерозоя до тония — первого периода неопротерозоя продолжалась эпоха, длившаяся 1,08 млрд лет и получившая название «Скучный миллиард» из-за отсутствия знаковых геологических и биологических событий в это время. Скучный миллиард выражен климати-



- 1 — кратоны, образовавшиеся более 2,3 млрд. лет назад; 2 — кратоны, образовавшиеся менее 2,3 млрд. лет назад; 3 — предполагаемые зоны субдукции;
Л — Лаврентия; Г — Гренландия;
Б — Балтика; С — Сибирь; А — Амазония;
ЗА — Западная Африка, К — Калахари;
И — Индия; ВА — Восточная Антарктида;
СК — Северный Китай;
ЮК — Южный Китай;
СевА, ЮжА, ЗапА — Северная, Южная, Западная Австралия

Рисунок 2 — Суперконтинент Колумбия 1,6 млрд. лет назад

ческой стабильностью, низким уровнем кислорода в атмосфере и очень медленной эволюцией живых организмов.

Главной формой жизни продолжали оставаться цианобактерии, в основном анаэробные, вырабатывающие серу. Увеличивается разнообразие водорослей, составляющих конкуренцию цианобактериальным матам. Появляются совместные цианобактериально-водорослевые сообщества, а также чистые водорослевые луга. Температура в мезопалеозое была на уровне 40–50 °С.

Мировой океан во время Скучного миллиарда содержал кислород только в приповерхностном слое (мощностью до 10 м), тогда как основная его часть была бескислородной и с высоким содержанием сульфидов, сульфатов, серы, сероводорода. Перемешивание вод в океане отсутствовало, что препятствовало проникновению кислорода на глубину. В таком состоянии океан существовал весь Скучный миллиард вплоть до оледенений в последней эре протерозоя.

Такой характер океана также стал следствием Великой кислородной катастрофы. Образовавшиеся на суше в восстановительной атмосфере сульфиды железа (минералы пирит, пирротин, марказит и др.) в кислородной атмосфере стали окисляться с образованием сульфата железа $FeSO_4$, который вследствие эрозионных процессов попадал в океан. Он использовался сульфатредуцирующими организмами для сульфатного дыхания, в результате которого выделяется сероводород. Сероводород, в свою очередь, использовался аноксигенными микроорганизмами для бескислородного фотосинтеза, при котором в качестве побочного продукта выделяется сера. Сероводородная прослойка не позволяла кислороду из приповерхностных слоёв проникать вглубь океана и окислять там растворённое железо.

Такую модель химического состава мезопротерозойского океана предложил в 1998 г. американский геохимик Д. Кэнфилд, который назвал процесс сероводородного заражения океана при отсутствии кислорода эвксинизацией (по

древнегреческому названию Черного моря — «Понт Эвксинский», где такие условия на глубине существуют и сегодня). В глобальном масштабе эвксинизация океана имела место несколько раз в фанерозое, с чем принято связывать события массовых вымираний. В настоящее время модель мезопротерозойского океана принято называть «океан Кэнфилда».

Особенностью докембрийского океана является очень высокая (в десятки раз выше современной) концентрация кремнезёма, так как ещё не появились организмы, использующие кремнезём в своей жизнедеятельности (диатомовые водоросли, радиолярии, силикофагелляты).

На период *калимния* 1,45 млрд лет назад приходится находка одного из древнейших известных многоклеточных организмов с тканевой организацией (род *Horodyskia*), систематическое положение которого пока не ясно. Он представляет собой колониальный организм, состоящий из расположенных каплевидные образований (зооидов — отдельных особей колониальных организмов), соединённые тонкой нитью-побегом [7] и, вероятно, с наличием в нижней части корневидных выростов, прикреплявших организм к субстрату.

В калимнии начался процесс распада суперконтинента Колумбия, продолжавшийся 1,6–1,3 млрд лет назад. Появился ряд рифтовых зон (вдоль западной окраины Лаврентии, Восточной Индии, южной окраины Балтики (современная северо-восточная Европа), юго-восточной окраины Сибири, северо-западной окраины Калахари и северной окраины Северо-Китайского блока), по которым произошёл раскол и расхождение континентальных блоков.

Окончательно распался континент уже в *эктазии* (1,3–1,2 млрд лет назад [6]). Этот период также характеризовался накоплением осадков и расширением осадочных чехлов, из-за чего и получил своё название (от греч. *ἐκτασις* — «расширение»). В отложениях этого периода обнаружены древнейшие ископаемые красные водоросли.

В *стении* (около 1,1 млрд лет назад) через 200–300 млн лет после распада суперконтинента Колумбия сформировался новый единый суперконтинент Родиния (рис. 3), омываемый океаном Мировия.

Около 1,2 млрд лет назад появляется половое размножение. До его возникновения изменчивость организмов обеспечивал лишь горизонтальный перенос генов — обмен генами между соседними организмами вне зависимости от степени их родства. Время возникновения полового размножения называют «дарвиновским порогом», так как до него организмы были предельно изменчивы и само понятие «биологический вид» отсутствовало. Лишь надёжная передача генетической информации от предков к потомкам, ставшая возможной благодаря половому размножению, позволяет обособляться совокупностям организмов, способных к взаимному скрещиванию, которое даёт в ряду поклонений плодовитое потомство, то есть биологическим видам, как реально существующим структурным единицам биоты. Только после этого становится возможной эволюция именно биологических видов, а не отдельных групп организмов, связанных отношениями «предок — потомок», и проявление описанных Дарвином закономерностей эволюции [9].



- 1 — складчатые пояса;
 Л — Лаврентия (северная Америка);
 Г — Гренландия; С — Сибирь,
 Б — Балтика (Северо-Восточная Европа);
 ЗЕ — Западная Европа;
 ЮК — Южный Китай;
 СК — Северный Китай; КЗ — Казахстан;
 И — Индия; Мд — Мадагаскар;
 Ан — Антарктида; Ав — Австралия;
 ЮА, ЦА, ЮА — Западная,
 Центральная и Южная Америка;
 ЮАм — Южная Америка;
 А — Амазония; Ас — Алтае-Саянский блок;
 ИК — Индокитай; Тш — Тяньшанский блок

Рисунок 3 — Реконструкция Родинии 1 млрд лет назад (по [8])

Неопротерозой

Первым периодом неопротерозойской эры является *тоний*, на который приходится конец «скучного миллиарда». Этим периодом датируются самые ранние находки животных — род отавия (рис. 4), которых большинство исследователей, относит к типу губок. Таким образом, многоклеточные животные возникли гораздо позже растений и грибов. Возможно, причина в том, что животные характеризуются активным движением и в силу этого требуют значительно большего количества кислорода (не менее 50 % от современного уровня [10]). Поэтому их возникновение стало возможным только при достиже-

нии концентрации кислорода в атмосфере определённого порогового значения, большего, чем необходимо для существования растений.

Также имеют место эпизодические находки совокупностей организмов,

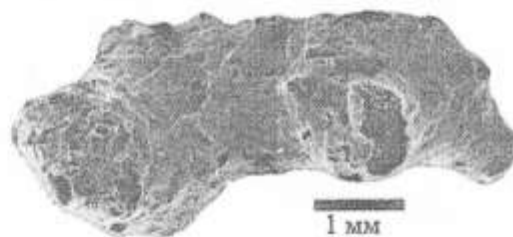


Рисунок 4 — Отавия

не похожих на последующие формы жизни, представляя собой, вероятно, прервавшиеся ветви эволюционного развития жизни на Земле (например, хайнаньская биота). Такие организмы изучены очень слабо, и пока не представляется возможным определить их систематическое и эволюционное положение.

Криогений. Само название этого периода неопротерозойской эры (от греч. «криос» — ледяной, морозный) говорит об особенностях развития Земли в данное время, заключающихся в наличии двух глобальных оледенений, покрывавших всю Землю, когда впервые после гуронского оледенения повторились эпизоды земли-снежка. Первое — стёртское оледенение — продолжалось около 70 млн лет с 717 до 643 млн лет назад, второе — марианоанское оледенение — около 15 млн лет с 650 до 635 млн лет назад. В отличие от гуронского оледенения, причиной которого явилось резкое снижение концентрации метана в атмосфере, эти оледенения были вызваны снижением концентрации другого парникового газа — углекислого. Дело в том, что углекислый газ атмосферы расходуется на химическое выветривание горных пород, превращаясь в растворимые в воде карбонат- или гидрокарбонат-ионы. Начало криогения характеризовалось процессами распада суперконтинента Родиния, при этом на участках разломов изливалось и застывало большое количество базальта, сразу начавшее подвергаться интенсивному химическому выветриванию. Концентрация углекислого газа начала снижаться, и началось оледенение Земли. Основную роль в том, что оледенение приобрело глобальный масштаб, сыграла конфигурация материков в тот период — вся суша сконцентрировалась в приэкваториальных областях, причём была вытянута вдоль экватора. Если бы суша была расположена у полюсов или хотя бы более равномерно была бы распределена в широтном отношении, то после начала оледенения ледяной по-

кров, продвигавшийся от полюсов к экватору, изолировал бы горные породы на части суши от атмосферы и химического выветривания, расход углекислого газа уменьшился бы и оледенение бы приостановилось.

Однако интенсивное выветривание продолжилось вплоть до полного смыкания ледяного покрова обоих полушарий. Поскольку вулканические процессы продолжали происходить и обеспечивать эмиссию углекислого газа, последний в конце концов достиг концентрации, достаточной для возникновения парникового эффекта и разогрева поверхности планеты, следствием которого стало очень быстрое таяние ледников, появление большого количества мелких окраинных морей и повышение их температуры до +50 °С. Такой цикл повторился в криогении два раза.

Во время оледенений резко сокращалась численность и разнообразие организмов, свет проникал в океан лишь в пределах немногочисленных участков трещин в ледниковом покрове или достаточно тонкого льда. Из эукариотов выживали главным образом красные водоросли и одноклеточный планктон.

Оледенения вызвали глобальное перемешивание воды в океанах — более холодные и плотные воды с поверхности перемещались вниз водной тощи, насыщая её кислородом. Это, во-первых, вызвало новый эпизод осаждения железа и образования джеспелитов, а во-вторых, создало условия для появления гетеротрофной жизни в более глубоких слоях океана, где недостаточно света для автотрофов. В конце периода возник гетеротрофный планктон, который питался одноклеточными водорослями и прокариотами и положил конец бактериальному доминированию в океанах.

Два крупных участка суши, образовавшиеся в результате раскола Родинии, начали перемещаться в сторону полюсов. В конце криогения они продвинулись в высокие широты, но между ними вклинилась Конголезская плита, вследствие чего около 600 млн. лет на-

зад вновь возник суперконтинент, объединивший почти всю сушу, — Паннотия, существовавший всего 60 млн. лет до конца протерозоя. В период максимального сближения Паннотия напоминала по форме букву V, открытую на северо-восток, окружающую собой протоокеан Панталасса и окружённую Панафриканским протоокеаном. В результате распада Паннотии образовался крупный континент Прото-Гондвана (от которого вскоре отделился австрало-антарктический блок) и ряд небольших континентов — Балтика, Лаврентия, Сибирь — а также более мелких участков суши (рис. 5), которые в мезозое объединились в последний суперконтинент Пангея.



К — Китай, Аф — Африка, Ми — Монгольская плита; Ам — Амурская плита; остальные обозначения см. в обозначениях к рисунку

Рисунок 5 — Распад Паннотии (по [8])

Эдиакарий. Последний период неопротерозоя и всего докембрия характеризовался развитием эдиакарской биоты — многоклеточных организмов, не обладающих скелетом. Это первая группа организмов, которая была широко распространена в различных регионах Земли, крайне разнообразна, в составе которой

выделено большое количество родов (более 140) и видов, которые сравнительно хорошо описаны. Эдиакарская биота (рис. 6, 7) очень сильно отличается от живых организмов более поздних периодов; по мнению большинства исследователей, между ними нет родственных связей, то есть эдиакарская фауна относится к полностью вымершим типам многоклеточных животных, и животные, появившиеся в начале фанерозоя во время кембрийского взрыва (и не являющиеся их потомками), быстро полностью их вытеснили.

Иногда к эдиакарской фауне применяется образное определение «черновики Господа Бога», как к первой, неудачной попытке создать многоклеточных животных. Также известно определение «Эдиакарский сад», по аналогии с Райским садом в Библии, где никто никого не ел (отношения «хищник — жертва» у животных появятся только на границе эдиакария и кембрия).

В изучении эдиакарских организмов большое значение придаётся их отпечаткам на породах, так как в связи с отсутствием твёрдых частей, значительно более успешно минерализующихся и превращающихся в окаменелости, чем мягкие ткани, окаменелостей этого периода найдено несравнимо меньше, чем последующего, кембрийского. Таксоны, выделенные исключительно по окаменевшим следам деятельности животных и их отпечаткам (ходы, отпечатки ног, копролиты, следы ползания, сверления, укусов и др.), называют ихнотаксонами, такие роды и виды — соответственно, ихнородами и ихновидами. В кембрий и позднее — наоборот: с появлением роющих животных, разрушавших отпечатки на мягком грунте, а также падальщиков, разрушавших мёртвые тела, обилие сохранившихся отпечатков резко сократилось.

Все представители эдиакарской биоты были морскими организмами, жизнь на суше ещё отсутствовала. С точки зрения современной биологии эдиакарские организмы были очень необычными.



1 — эдиакария; 2 — бельташелла; 3 — Medusinites; 4 — Mawsonites; 5-6 — цикломедузы;
7 — Copomedusitas; 8 — чарния; 9 — чарниодискус; 10 — птеридиниум; 11 — сприггина;
12-14 — дикинсония; 15 — парванкорина; 16 — прекамбридум; 17 — трибрахидиум;
18 — акритархи; 19 — вендин

Рисунок 6 — Реконструкция поздней эдиакарской биоты

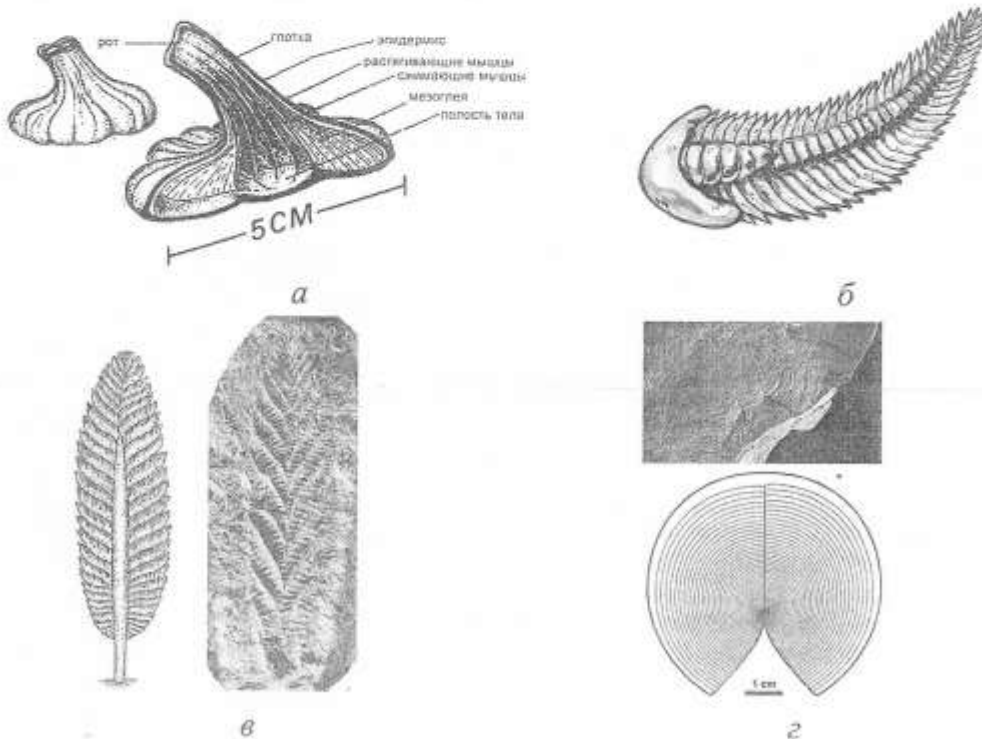


Рисунок 7 — Представители эдиакарской биоты
а — инария; б — сприггина; в — чарния; г — оватоскутум

В общем случае это были тонкие, но большие по площади организмы с дополнительными приспособлениями для увеличения общей площади — складками, перьеобразными наростами, мелкими трубкообразными формами и т. п. Эти особенности необходимы для увеличения отношения площади тела к его объёму: считается, что дыхание и поглощение питательных веществ осуществлялось всей поверхностью тела. Поэтому у многих представителей данной биоты не отмечено никаких признаков рта, ануса, глаз, ног, усиков или любых других придатков или органов. Многие представители имели в своём уплотнённом теле симбиотические водоросли или хемоавтотрофные бактерии. По форме они были дискообразные (трибахидиум, цикломедуза, оватоскутум), в форме «стёганных одеял», состоящие из поперечных гребней, отходящих в стороны от центральной оси (дикинсония,

чарния, сприггина, ёргия), мешкообразные (инария), кольцообразные (обамуз), овальные (кимберелла), трубкообразные (вутубус) и др., по размерам — от миллиметров до метров (рис. 6–9). Вели в основном прикреплённый образ жизни либо «паслись» на цианобактериальных матах, однако встречались и активнодвигающиеся формы.

Наиболее интересные эдиакарские животные, напоминающие по форме стёганные одеяла, относятся к вымершему типу проартикуляты (рис. 8): сприггина, онега, дикинсония, ёргия, вендия, цианорус, оватоскутум и др. Это животные с двусторонне-симметричным рифлёным телом, некоторые из них внешне напоминали таких членистоногих, как трилобиты. Однако от членистоногих и кольчатых червей их отличает строение тела: сегменты сдвинуты друг относительно друга вдоль продольной оси отпечатка. Такой сдвиг можно охарактере-

Географія. № 6, 2022

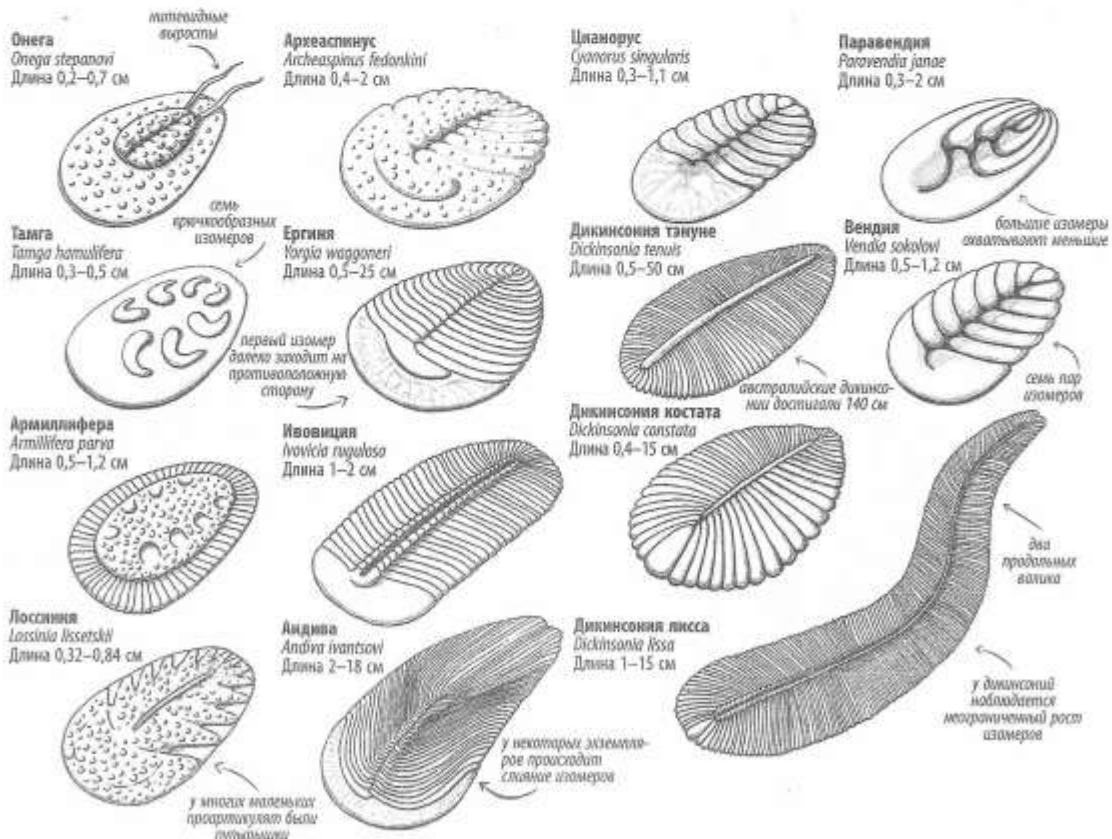


Рисунок 8 — Представители типа проартикуляты (по Н. Линатовой)

ризовать симметрией скользящего отражения (например, подобной симметрией обладает косичка из трёх прядей). Наиболее известным представителем являются дикинсонии (рис. 9).

У них наблюдается неограниченный изометрический рост — увеличение геометрических размеров с сохранением пропорций до тех пор, пока организм не будет захоронен осадочными породами или убит каким-либо другим способом. Большую часть жизни они, вероятно, проводили в неподвижности, прикрепленные к донным осадкам, однако могли передвигаться с места на место [11].

Эдиакарские животные не обладали какими-либо механизмами защиты против хищников, так как в основном их представители питались на тот момент микроскопическими водорослями или растворёнными в воде веществами. Возможно, это стало причиной того, что при появлении существ, способных активно отыскивать добычу и захватывать её крупными кусками, чтобы переварить внутри, всё разнообразие данной биоты очень быстро исчезло.

Усложнение организации животных происходило по мере увеличения концентрации кислорода в воде в течение всего эдиакария, что позволило интен-

сифицировать обмен веществ и перейти к активному образу жизни, заполучить двигательную систему и рот. Первые такие организмы передвигались по водорослево-цианобактериальным матам, постепенно выедавая их. Для доступа к частям растений, укоренённым в грунте, ряд организмов освоил проникновение в грунт, рытьё вертикальных и горизонтальных ходов в нём, что привело к насыщению грунта кислородом и облегчило дальнейшее его освоение другими видами. Разнообразие водорослей, ранее представленное немногочисленными доминирующими видами, стало заметно повышаться (согласно известному экологическому закону, что в условиях давления хищников разнообразие его жертв повышается по сравнению с сообществом, где хищников нет вовсе).

Таким образом, в позднем эдиакарии существенно увеличилось количество экологических ниш, что стало одним из факторов резкого увеличения разнообразия организмов в последующий кембрийский период палеозойской эры (кембрийский взрыв).

На протяжении всего докембрия происходило геохимическое обеднение биосферы — уменьшение доступности химических элементов для живых организмов [10]. Химическое обеднение гидросферы и атмосферы вызывалось уменьшением вулканической активности (и, соответственно, уменьшением поступления веществ с вулканическими выбросами, включая вещества — агрессивные агенты выветривания, вследствие чего снизилась скорость выветривания и поступления её продуктов в океан), остыванием планеты (снижавшим скорость химических реакций в планетарном масштабе, которые замедляются в 3–4 раза на каждые 10 °C снижения температуры, что, по сути, является аналогом геохимического обеднения), ростом континентов

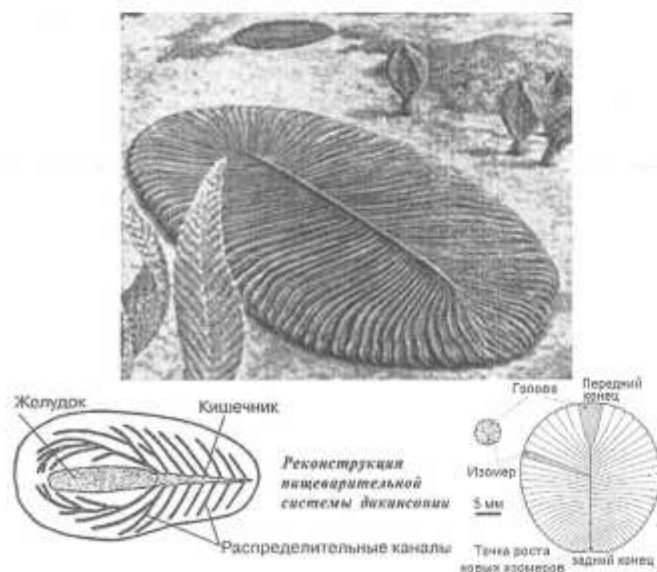


Рисунок 9 — Дикинсония и её строение

(в процессе которого огромное количество разнообразных элементов выводилось из геохимического круговорота вследствие отсутствия механизма утилизации континентальной коры). Активное формирование месторождений в докембрии также выводило из круговорота соответствующие элементы, особенно огромные массы металлов. Появление свободного кислорода привело к окислению многих элементов, в том числе многих металлов, и переходу их в биодоступную форму. Это сильно изменило условия существования докембрийских организмов, так как в бескислородной восстановительной горячей гидросфере раннего архея многие металлы были высокоподвижными и доступными для биохимических реакций, что позволяло им успешно выполнять свою исключительную биохимическую роль, обусловленную структурной функцией металлоорганических соединений, высокой каталитической активностью (атомы металлов являются активным каталитическим центром большинства известных ферментов).

Оледенения криогения, вызвавшие проникновение холодных вод в глубокие

слои океана и обогащение его кислородом, привели к геохимическому обеднению и существенному снижению температуры, а следовательно, скорости химических реакций во всей толще океана.

Химический состав объектов выветривания менялся во времени: от ультраосновных к кислым вулканическим породам и далее к осадочным толщам. Геохимический аспект этого тренда — от выветривания обогащенных тяжелыми металлами пород к бедным — уменьшал вынос важнейших биофильных элементов в океан [10].

Ответом на процессы геохимического обеднения со стороны биоты стал рост биологической сложности организмов и экосистем: освоение более энергетически выгодного механизма дыхания, появление и постепенное усложнение эукариотической клетки, возникновение и прогрессивно возрастающее развитие гетеротрофии, возникновение хищничества, различных формы симбиоза, удлинение и разветвление пищевых цепей, формирование биологических механизмов накопления и удержания металлов внутри клетки и в экосистеме и т. д.

Список использованных источников

1. *Holland, H.* The oxygenation of the atmosphere and oceans / H. Holland // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. — 2006. — Vol. 361. — P. 903–915.
2. *Ястребов, С. А.* Кислородная революция и Земля-снежок / С. А. Ястребов // *Химия и жизнь* — XXI век. — № 9. — 2016. — С. 33–37.
3. *Knoll, A. H.* The early evolution of eukaryotes: a geological perspective / A. H. Knoll // *Science*. — 1992. — V. 256. — P. 622–627.
4. *Hazen, R.* Mineral Evolution / R. Hazen [et al.] // *American Mineralogist*. — Vol. 93. — 2008. — P. 1693–1720.
5. *Кузьмин, М. И.* Биография Земли: основные этапы геологической истории // М. И. Кузьмин, В. В. Ярмолюк // *Природа*. — № 6. — 2017. — С. 12–25.
6. *Zhao, G.* A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup / G. Zhao, M. Sun, S. Wilde, S. Li // *Earth-Science Reviews*. — 2004. — Vol. 67. — P. 91–123.
7. *Fedonkin, M. A.* The origin of the Metazoa in the light of the Proterozoic fossil record / M. A. Fedonkin // *Paleontological Research*. — 2003. — Vol. 7. — No. 1. — P. 9–41.
8. *Сорохтин О. Г.* Развитие Земли / О. Г. Сорохтин, С. А. Ушаков. — М : Изд-во МГУ, 2002. — 506 с.
9. *Ястребов, С. А.* Семь порогов в истории жизни / С. А. Ястребов // *Химия и жизнь* — XXI век. — 2016. — № 8. — С. 20–22.
10. *Федонкин М. А.* Сужение геохимического базиса жизни и эукариотизация биосферы: причинная связь / М. А. Федонкин // *Палеонтологический журнал*. — 2003. — № 6. — С. 33–40.
11. *Retallack, G. J.* Growth, decay and burial compaction of Dickinsonia, an iconic Ediacaran fossil / G. J. Retallack // *Alcheringa : an Australasian Journal of Palaeontology*. — 2007. — Vol. 31. — No. 3. — P. 215–240.

Дата поступления материала 17.01.2022.