



Проф. **В.В. МАЛАХОВ** vmalachov@inbox.ru,
биофак МГУ им. М.В Ломоносова, г. Москва

Жизнь и смерть планеты Земля

Продолжение. См. № 4/2013

Рассказано, как и когда возникла планета Земля и её биосфера, рассмотрены основные этапы эволюции жизни на Земле. почему появилась человеческая цивилизация и почему она неизбежно погибнет, как будет развиваться жизнь на Земле после человека, чем она закончится, а также о том, что ждёт нашу планету и само Солнце.
Ключевые слова: происхождение Солнечной системы, Земли и Луны, эволюции жизни на Земле.

От первых органических тел до человеческой цивилизации

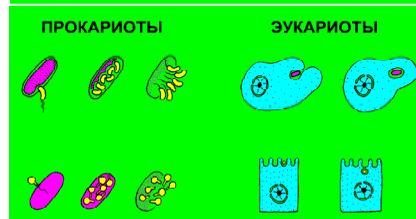
Деятельность в раннем протерозое первых фотосинтетиков, выделяющих кислород, приводила к формированию железорудных месторождений в результате химических реакций, в частности:

- $Fe + H_2O + CO_2 \rightarrow Fe(HCO_3)_2$ – при растворении железа в горячей и кислой среде первичного океана;
- $2Fe(HCO_3)_2 + O \rightarrow Fe_2O_3 + 4CO_2 \uparrow + 2H_2O$ – образование гематита;
- $3Fe_2O_3 \rightarrow 2Fe_3O_4 + O$ – превращение гематита в магнетит.

Большинство железных руд, которые мы используем, конечно, созданы бактериями. Примером может служить огромная Курская аномалия, сформировавшаяся примерно 2,2 млрд лет назад. Бактерии обладают огромным разнообразием метаболических процессов, они способны окислять многие металлы, вплоть до золота.

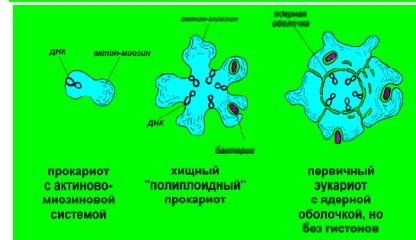
Биосфера на ранних этапах своего существования, в первые как минимум 2 млрд лет, состояла только из прокариотных организмов, только из бактерий. Можно даже предположить, что первый миллиард лет жизнь существовала не в виде индивидуальных бактериальных тел, а в виде каких-то плёнок. Прокариотный биотический круговорот очень несовершенен. Фото- или хемосинтетические бактерии в своей жизнедеятельности используют углекислый газ как источник углерода, создают органическое вещество за счёт фотосинтеза или реакций окисления, но это органическое вещество очень медленно разлагается под действием физических и химических факторов и, в основном, захоранивается. то есть выходит из биологического круговорота. Бактериям приходится снова брать углекислый газ из окружающей среды, благо на ранних этапах развития Земли его было достаточно в атмосфере.

Почему бактерии не могут возвращать продукты своей жизнедеятельности в биологический круговорот? Просто бактерии не умеют никого глотать в отличие от эукариотных организмов, которые хорошо умеют друг друга глотать и постоянно этим занимаются. У бактерий же нет таких белков – актина и миозина, – которые обеспечивают точную подвижность, они могут питаться только осмотически, выделяя ферменты наружу и всасывать продукты экзоферментации субстрата. Вот поэтому ранние этапы жизни характеризовались захораниванием громадного количества органического вещества, впоследствии превра-



а здесь что?

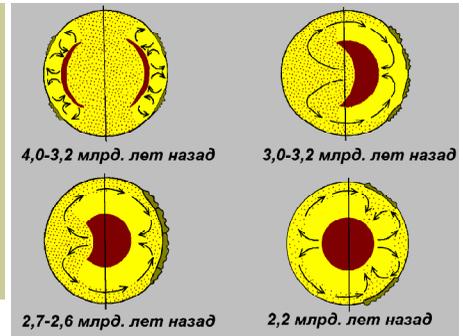
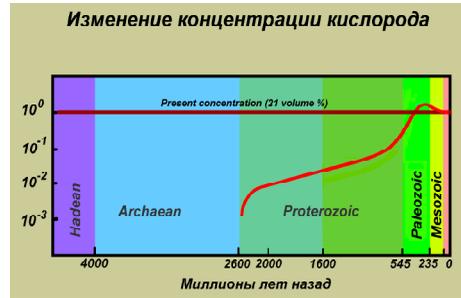
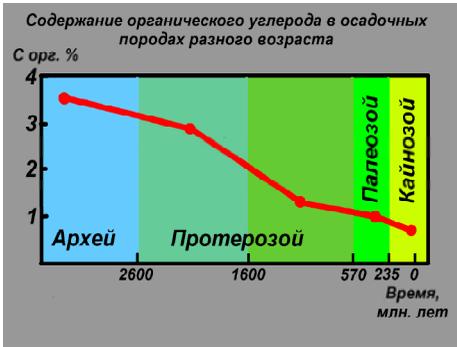
вирус?



Акритархи - остатки эукариотных клеток появляются 1,9 -1,5 млрд. лет назад



Печатается по докладу на Всероссийском Фестивале науки (см. запись прямой трансляции из Шуваловского корпуса МГУ 14.10.2012, начало в 14 ч 37 мин 30 с URL: <http://www.festivalnauki.ru/video/13496>), г. Москва. Презентация представлена на диске. См. также видеолекцию http://polit.ru/article/2012/05/09/anons_malakhov/ – *Ред.*



тившегося в нефть, газ, сланцы, а также рассеиванием его в горных породах.

На слайде ?? показано, что могут делать эукариоты и что они постоянно делают: они друг друга глотают. Что обеспечивает формирование пищеварительной вакуоли у амёбы или, скажем, у блуждающих белых клеток крови? Актино-миозиновая система. Как вы заражаетесь вирусами? Вирус контактирует с клеточной мембраной, и клетка, принимая его за что-то полезное, тут же фагоцитирует, и дальше вирус начинает свою разрушительную деятельность.

Бактерии так делать не умеют. Обратите внимание: среди бактерий совершенно нет хищников. На слайде я показал бделловибрион (*Bdellovibrio*), который как бы хищничает на кишечной палочке. Но хищник получается мельче жертвы, он пробуравливает клеточную стенку, размножается внутри клетки, используя её метаболизм, и, когда клетка разрушается, выходит из неё. Вирус также не может проникнуть в бактерию: он впрыскивает в неё свою нуклеиновую кислоту, а сам остаётся снаружи. А всё дело в том, что у бактерий нет актино-миозиновой системы.

Видимо, именно появление актина и миозина обеспечило появление эукариотных организмов. Очень и очень схематично этот процесс показана на слайде ????. Хищник, глотающий жертву, должен быть по крайней мере на три порядка по объёму больше неё. Требуется гораздо большее количество ядерного материала, ДНК. Нитевидные длинные бактерии становятся полиплоидными, у них много кольцевых молекул ДНК, кольцевых генофоров. Можно предположить, что и у предка эукариотов таких генофоров было много. Высокая подвижность цитоплазмы требовала изоляции генетического материала в центральном компоненте клетки, то есть формирования ядра. Здесь оно показано как результат глубоких впячиваний поверхностной мембраны. Происходит сегрегация клетки на две зоны: в одной хранится ядерный материал, а в другой собственно формируются псевдоподии за счёт актино-миозиновой активности.

При всей умозрительности предложенной схемы мы и сейчас, как ни странно, находим в нашей биоте организмы, в которых имеется клеточное ядро, но ядерный материал представлен кольцевыми молекулами ДНК, лишёнными гистонов. У большинства эукариотных организмов молекулы ДНК линейные, связанные

с гистонами, но как ни удивительно, существуют простейшие эукариотные организмы динофлагелляты, у которых в ядре нет гистонов, а генофоры представлены кольцевыми молекулами, как у бактерий.

В ископаемом материале, начиная с возраста около 2 млрд лет, начинают появляться так называемые акритархи – это древние эукариотные клетки (разнообразные протисты, водоросли, образующие покоящиеся стадии или цисты). Важно, что они большие, размером 50–70 мкм. Шарообразные бактерии такого размера не бывают – ведь питание у них идёт через поверхность тела.

Появление живых организмов, которые могут друг друга глотать, означает громадное ускорение биотического круговорота и снижение количества захораниваемого органического вещества. Действительно, человек за день съедает примерно килограмм углерода. Разве он поправляется при этом на 1 кг? Нет, съеденный углерод связывается с кислородом при переваривании пищи, выдыхается в виде углекислого газа и потребляется растениями, которые потом становятся пищей. Действительно, количество органического углерода в осадках резко снижается почти от 4% в архее до менее 1% в позднем фанерозое. Это означает, что биотический круговорот стал более совершенным, и большая часть углерода стала возвращаться в него. Конечно, кроме того углерода, который вышел из круговорота в архее и протерозое.

С появлением эукариотных организмов совпало важнейшее событие в эволюции биосферы – появление кислорода. Хорошо известно по составу пород, что в первые миллиарды лет существования Земли атмосфера была бескислородной (только тогда могут формироваться, например, пириты). А начиная примерно с 2 млрд лет появляются так называемые красноцветы – породы, окисленные не в воде, а на воздухе. Это говорит о том, что концентрация кислорода (а его создают фотосинтетики) превысила 1% от современной. И это была полная экологическая катастрофа, потому что кислород – необыкновенно агрессивен, он разрушает биологические молекулы, разрушает мембраны, нуклеиновые молекулы. Выжить смогли только те организмы, которые приспособились к высокой концентрации кислорода.

Почему же первые два миллиарда лет атмосфера была бескислородной? Фотосинтез-то начался

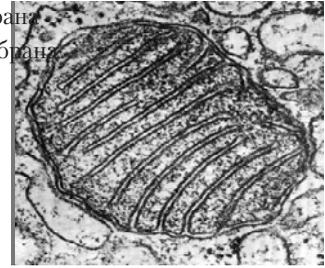
15 ч 50 м

3,8 млрд лет назад! Куда же девался кислород? Он шёл на окисление железа. Ведь только 2,2 млрд лет назад сформировалось земное ядро, и основная часть железа ушла вглубь Земли, а до этого поверхностные слои Земли были богаты железом. И только начиная с рубежа между археем и протерозоем кислород стал накапливаться в атмосфере. Но, конечно, и в бескислородной атмосфере были маленькие карманы, где кислорода было очень много, а именно карманы внутри строматолитов, где идёт интенсивный фотосинтез. (В современных сильно засоленных прогреваемых водоёмах, где формируются цианобактериальные маты в виде плёнок, всегда можно увидеть пузырьки практически чистого кислорода.) Хотя в толще строматолитов существовала в основном прокариотная биота, представленная оксифильными бактериями (типа современных альфа-протеобактерий), но имелись и предки эукариотных организмов, сумевшие приспособиться к высокому содержанию кислорода, вступив в симбиоз с альфа-протеобактериями. А как же человек может выносить высокую концентрацию кислорода, если цитоплазма наших клеток анаэробна? Просто у нас в клетках есть органелла митохондрия с двумя мембранами: наружной (мембрана вакуоли, в которой сама митохондрия находится) и внутренней, образующей кристы. 2–2.5 млрд лет назад хищные предки эукариотов не стали переваривать заглоченные оксифильные бактерии, а вступили с ними в симбиоз. И теперь содержат их как симбионтов внутри цитоплазмы. Мы – эукариоты, и нам хочется считать, что мы были в своё время настолько мудрыми, что приобрели «рабов», которые работают на нас, позволяя нам выживать в кислородной атмосфере: они потребляют не нужные нам продукты обмена и снабжают нас за это энергией в виде АТФ. А они наверняка вполне могли бы думать о нас: какие дураки, предоставляют нам возможность жить, да ещё и кормят. Митохондрии сохраняют автономию в клетке, размножаются путём деления, имеют собственный генетический аппарат в виде кольцевой молекулы ДНК (правда очень маленькой, потому что большинство митохондриальных генов давно перенесено в ядро эукариотной клетки, тем не менее часть генов остаётся) и собственный белоксинтезирующий аппарат с рибосомами прокариотного типа.

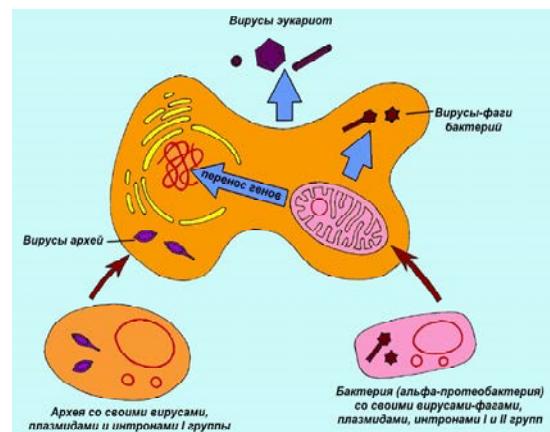
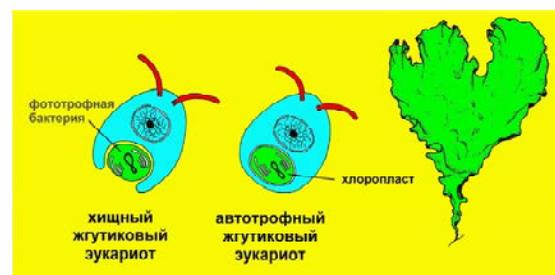
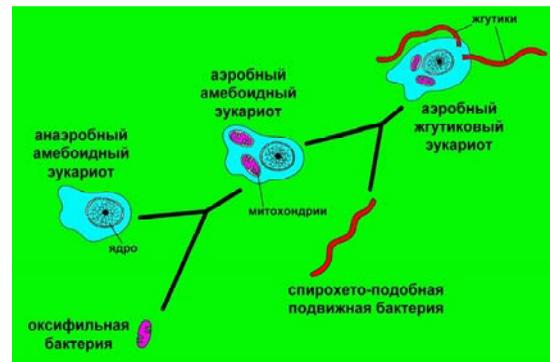
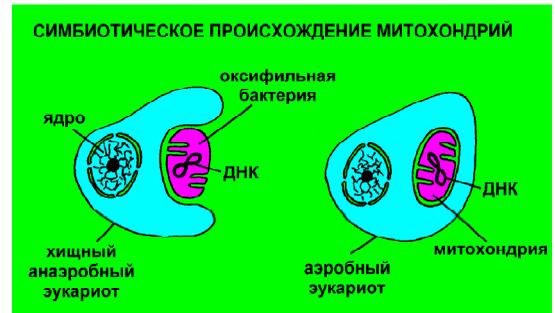
Симбиотическая концепция происхождения эукариотной клетки – клетки, возникшей из двух компонентов (нуклеоцитоплазмы и митохондрии), – часто дополняется представлениями и о симбиотическом происхождении жгутика и хлоропласта, которые позволили эукариотным организмам быть не только животными, но и растениями. Хлоропласты в зелёных растениях, в водорослях представлены органеллами, в которых есть собственный белоксинтезирующий аппарат и собственный генетический аппарат в виде кольцевой молекулы ДНК, размножаются они делением. Надо заметить, что не все хлоропласты произошли от бактерий, известны и другие пути.

Симбиотическая концепция происхождения основных компонентов эукариотной клетки (нуклеоцитоплазмы, митохондрии жгутиков и хлоропласта) является парадигмой современной науки и связывается с именем американского биолога Линн Маргулис. Однако эта концепция была очень детально разработана за 70 лет до Л. Маргулис русским ботаником Константином Сергеевичем Мережковским, работы

Наружная мембрана
Внутренняя мембрана
Кристы



15 ч 53 м



Билатерально-симметричные Metazoa вендского периода (около 600 млн. лет назад)

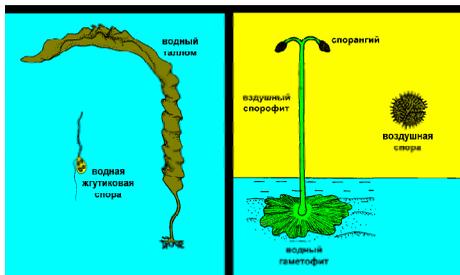


Первые многоклеточные (около 600 млн лет назад)



Кембрийские многоклеточные

Кембрийские многоклеточные (?? млн лет назад)



ПЕРВЫЕ НАЗЕМНЫЕ РАСТЕНИЯ



Настоящие леса (350 млн лет назад)

которого 1904–1910 гг. не были поняты современниками – он слиш-16 ч 06 м ком обогнал своё время.

Современная концепция происхождения эукариотной клетки предполагает, что её структуру определили два главных компонента: архея с её нуклеоцитоплазмой и большинством генов, связанных с работой ядерного аппарата (гены дупликации, транскрипции, трансляции), и эубактериальная клетка с большинством генов метаболических процессов. Наши вирусы тоже имеют двойное происхождение: часть от археобактериальных, а часть от эубактериальных предков (последние дали начало митохондриям).

Первые многоклеточные животные появились очень поздно: примерно 600 млн лет назад, первые наземные растения – 450–430 млн лет назад, настоящие леса – 350 млн лет назад, в каменноугольном периоде. Однако большая часть созданной растительностью биомассы захоранивалась: громадные стволы голосеменных растений и семенных папоротников падали, заносились осадками и превращались в залежи каменного угля. Дело в том, что было мало насекомых. Бактерии и грибы могут проникнуть в древесину, только если её кто-то погрыз, измельчил, сделал в ней ходы. Древние насекомые, как и примитивные насекомые сегодня, имеют грызущий ротовой аппарат, который позволяет измельчать эту биомассу. Кстати благодаря тому, что биомасса захоранивалась, кислород, который выделялся в процессе фотосинтеза, не расходовался снова на окисление углерода, и его концентрация в атмосфере достигала почти 40% (почти в два раза больше, чем сейчас). Это позволяло первым насекомым достигать большого размера: размах крылья у первых каменноугольных насекомых достигал 1 м. Объясняется этот факт тем, что в трахейной системе газообмен идёт за счёт диффузии, и чем больше внешняя концентрация кислорода, тем больше скорость диффузии (и соответственно длина трахеи). В тропиках, например, где скорость диффузии больше, и сейчас насекомые крупнее, чем их более северные собратья. Сейчас биомассу создают зелёные растения, а уничтожают её грызущие насекомые. То же и в океане: вся биомасса создаётся диатомовыми водорослями, а 90% диатомовых водорослей поедает капиподы.

Взять углерод из захороненных отложений и использовать его для строительства новых организмов животные не могут. Но 7–8 тыс. лет назад появилась особая группа организмов – люди, которые создали цивилизацию. В чём смысл существования человеческой цивилизации с биосферной точки зрения? В том, чтобы добыть и сжечь уголь, нефть и газ и вернуть CO₂ в атмосферу, добыть сконцентрированные при участии бактерий руды, добыть из них металлы и спустить всё это в Мировой океан. Углерод войдёт в тела живых организмов, растворённые металлы станут основой новых ферментных систем, и биосфера начнёт новый этап своего развития. Человеческая же цивилизация, исчерпав источники своего существования и выполнив своё предназначение, отомрёт естественным путём.

16 ч 11 м



Битва древних стрекозы и таракана



Проф. **В.В. МАЛАХОВ** vmalachov@inbox.ru,
биофак МГУ им. М.В Ломоносова, г. Москва

Окончание. См. № 3, 4/2013

Жизнь и смерть планеты Земля

Рассказано, как и когда возникла планета Земля и её биосфера, рассмотрены основные этапы эволюции жизни на Земле, почему появилась человеческая цивилизация и почему она неизбежно погибнет, как будет развиваться жизнь на Земле после человека, чем она закончится, а также о том, что ждёт нашу планету и само Солнце.

Ключевые слова: происхождение Солнечной системы, Земли и Луны, эволюции жизни на Земле.

Почему молчит Вселенная?

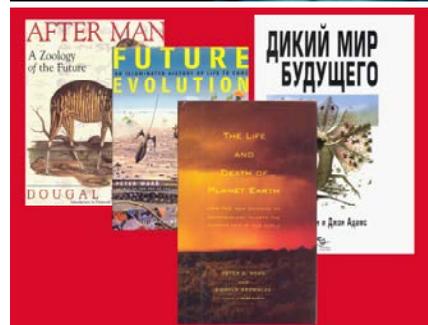
Вам, наверное, хочется думать, что человеческая цивилизация найдёт новые источники энергии, выйдет в космос, освоит ближние окрестности Солнечной системы, потом начнёт перестраивать Галактику, что нас ожидает большое будущее? Ничего подобного. Вы не задумывались, почему молчит Вселенная? Почему не находят никаких следов деятельности инопланетных цивилизаций? Ведь многие цивилизации должны были возникнуть многие миллионы и миллиарды лет! Если бы они имели такие потенциалы развития, на какие вы надеетесь, мы бы видели космические результаты их деятельности. Мы бы видели перестройки в комическом пространстве, а мы не видим вообще никаких следов. Почему? Потому что время существования цивилизаций очень ограничено. Они обязательно возникают при развитии любой биосферы, потому что появляется ресурс их существования – ископаемые источники энергии. А если есть ресурс, обязательно появляется группа организмов, которая начинает этот ресурс использовать.

Но время существования цивилизации короткое. Пока в одном месте Вселенной цивилизация возникла, в другом она уже исчезла. Они не соприкасаются в пространстве и времени.

Что будет после человека? Биосфера получит новый импульс и будет развиваться дальше. На эту тему существует обширная литература, люди думают, делают прогнозы.

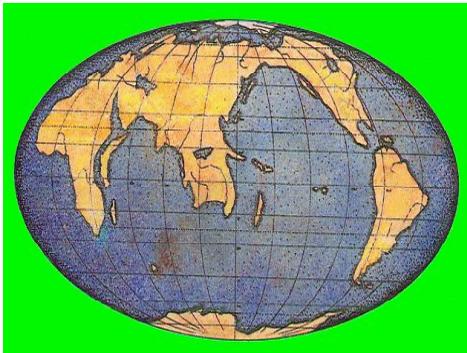
Сейчас мы живём в ледниковой эпохе. Непонятно почему, но периодически на Земле наступают ледниковые эпохи продолжительностью 25–40 млн лет, полюса планеты покрываются ледяными шапками, которые то разрастаются, то сокращаются. Затем наступает период межледниковья с влажным тёплым климатом продолжительностью 150–200 млн лет, когда ледяные шапки на полюсах исчезают полностью. Последние 100 млн лет Антарктида находится на Южном полюсе, но ледяная шапка появилась на ней лишь 35 млн лет назад. А до того там бегали динозавры, сумчатые (которые через Антарктиду прибежали из Южной Америки в Австралию). Последнее наступление ледника было 17 тыс. лет назад, в России его называют Валдайским, потому что льды дошли примерно до Валдайской возвышенности. Мы живём в промежутке между двумя наступлениями ледников. На карте показано, как будет выглядеть наша Земля через 2 млн лет в одно из очередных наступлений ледника. Такие наступления происходят примерно каждые 40–50 тыс. лет. Ледяные шапки увеличиваются, климат становится более сухим (мало жидкой воды), уровень мирового океана опускается. На месте тропических лесов возникают степи. Представленные на карте контуры материков слегка изменены, но не за счёт движения ли-

Печатается по докладу на Всероссийском Фестивале науки (см. запись прямой трансляции из Шуваловского корпуса МГУ 14.10.2012, начало в 14 ч 37 мин 30 с URL: <http://www.festivalnauki.ru/video/13496>), г. Москва. Презентация представлена на диске. См. также видеолекцию http://polit.ru/article/2012/05/09/anons_malakhov/ – Ред.

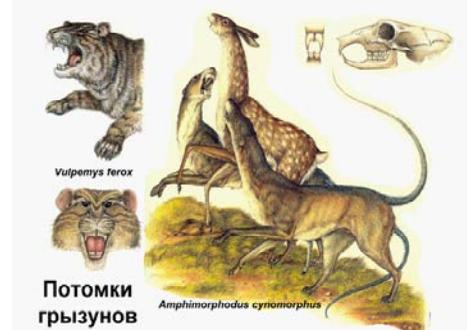




Бабукари



Потомки зайцеобразных



Потомки грызунов



Потомки приматов

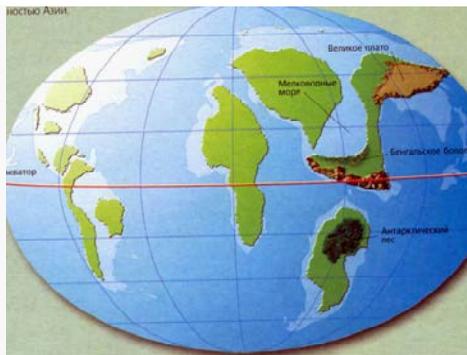
Потомки рукокрылых

тосферных плит, а за счёт опускания уровня мирового океана.

Вымирание организмов, которое идёт сейчас и которое отчасти организовано человеком, будет продолжаться. Нарисуем возможную картину будущего. Крупные китообразные вымерли, их место заняли крупные нелетающие морские птицы – китовые олуши размером 5–6 м. На месте амазонского леса возникла саванна, и те обезьяны, которые жили в лесу, вынуждены приспособиться к жизни в саванне, как когда-то сделали наши предки. Трава в степи высокая, могут незаметно подкрасться хищники, надо ходить на двух ногах. (Ведь и в нашей истории был очень долгий период, когда в африканской степи жили двуногие обезьяны. не люди, а именно прямоходящие обезьяны – австралопитеки вовсе не люди.) Обезьяны аиакари, которые жили в наше время в амазонской сельве, дали начало обезьянам бабукари, живущим в степи и вынужденным приподыматься и ходить на двух ногах. Для дальней коммуникации они пользуются хвостами, а для ближней – очень выразительные раскрашенные морды.

А вот контуры материков через 50 млн лет. Уже сказывается движение литосферных плит, дело идёт к новой Пангее, Африка и Австралия сближаются с Евразией. Ледниковая эпоха кончилась, льда нет. Уровень океана стоит высоко. Вымирает много животных. Место антилоп в группе копытных животных занимают зайцы. На слайде ?? показаны зайцеантилопы и зайцеверблюды, а также эволюция стопы. Крупные хищники вымерли, их место занимают животные, выросшие из группы, процветавшей во время существования человека, – из грызунов. На слайде ?? показаны крысволки, нападающие на зайцеантилопу. Показано также, как резцы грызунов превращаются в клыки хищников. На следующем слайде – потомки приматов. Бабуины африканской саванны эволюционировали в обезьянольвов и обезьянотигров. На островах, как мы знаем, многие птицы утрачивают крылья. На слайде – рукокрылые на тихоокеанских островах, потерявшие способность к полёту. Некоторые приманивают насекомых ярко раскрашенными ушными раковинами и носовыми выростами. Внизу справа – слепой ночной ходок, тоже потерявший крылья, но использующий эхолокацию, который перемещается на передних конечностях (они когда-то были крыльями), а задними удерживает добычу.

Вот карта Земли через 150 млн лет. Земля тёплая, влажная, уровень океана на 150 м выше современного, контуры материков изменились ещё больше, Антарктида сдвинулась с полюса и начала движение к общей группе материков. В тёплой и влажной атмосфере млекопитающие потеряли свои преимущества, теплокровность, волосяной покров уже мешает, млекопитающие вымирают. На сушу выходят многие группы организмов, живших только в воде. Вот болотный осьминог, который, как и многие другие головоногие моллюски из солёных болот, передвигается по суше на четырёх щупаль-



цах, превратившихся в подобие ног, а четырьмя другими ловит добычу. В тёплой и влажной атмосфере насекомые стали опять большими, и теперь уже сами охотятся на птиц.

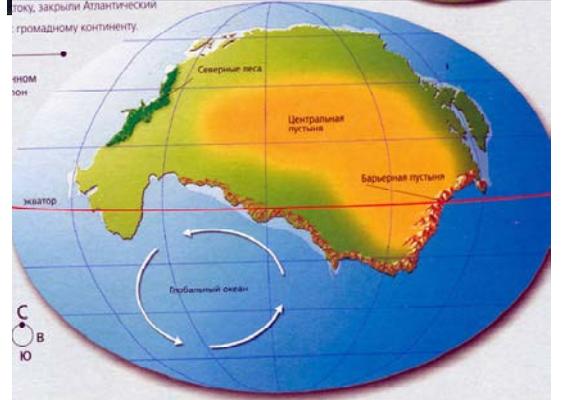
Млекопитающие почти все вымерли. Один из оставшихся видов живёт как симбионт в норах колониальных пауков. Хелицерные, к которым принадлежат пауки, не могут пережёвывать пищу, они могут только высасывать. Но колониальных пауки строят гигантские сети, в которые попадают семена растений/Пауки их складывают в подземные хранилища, где обитают последние потомки млекопитающих, из-за полной темноты глаза их стали большими и круглыми. Эти животные питаются зёрнами, а пауки пьют их кровь.

Через 500 млн лет все материки собираются в новую Пангею – гигантский материк с гигантской пустыней в центре, которую омывает один гигантский океан. Только на побережье могут формироваться леса. В чаще можно услышать тяжёлую поступь мегакальмара – огромного существа размером с нашего слона. Это растительноядное животное, ходит он на восьми ногах, а десятью щупальцами срывает ветки. И млекопитающие, и птицы все вымерли. Место птиц занимают летучие рыбы. На слайде – океанский флиш, типа наших альбатросов. А вот маленькая рыбка колибри – лесной флиш, полностью потерявшая связь с водой. В ветвях резвятся сквидбоны??.

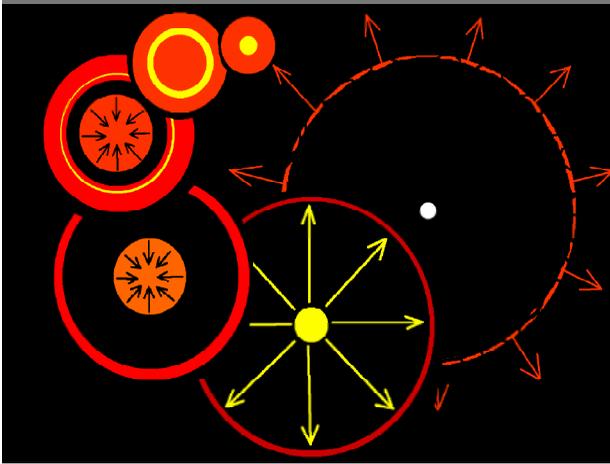
А что дальше?

Звёзды типа нашего Солнца живут примерно 10 млрд лет. Как мы уже говорили, сначала в центре звезды идёт ядерная реакция, затем, когда выгорает водород, ядерная реакция перемещается на периферию, при этом светимость звезды увеличивается. Сейчас, например, Солнце светит на 30% ярче, чем 4,5 млрд лет назад. Зона ядерной реакции расширяется, а холодные центральные области звезды сжимаются. Наступает гравитационный коллапс, который приводит к отрыву периферических областей от центральных, страшному разогреву, синтезу сверхтяжёлых элементов и в конце концов ко взрыву звезды и сбрасыванию наружных оболочек.

Судьба звезды зависит от её начальной массы. Очень массивная звезда (более 10 масс Солнца) превращается в чёрную дыру. Хотя непосредственно чёрную дыру наблюдать невозможно, о её существовании можно догадаться по перетеканию на чёрную дыру вещества звезды-соседки. Перетекающее вещество (горячий ионизированный газ) закручивается, и поскольку движется с ускорением, то излучает. Если масса звезды 5–7 масс Солнца, то очень велика вероятность превращения её в нейтронную звезду, крошечную по размеру (10–12 км), но с громадной плотностью – в несколько раз превышающей плотность атомного ядра



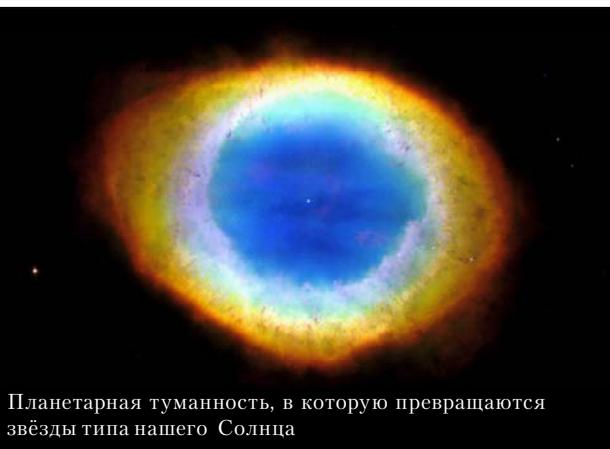
Лесной флиш



Если масса звезды больше 10 масс Солнца, то она заканчивает своё существование как чёрная дыра



Знаменитый пульсар – Крабовидная туманность

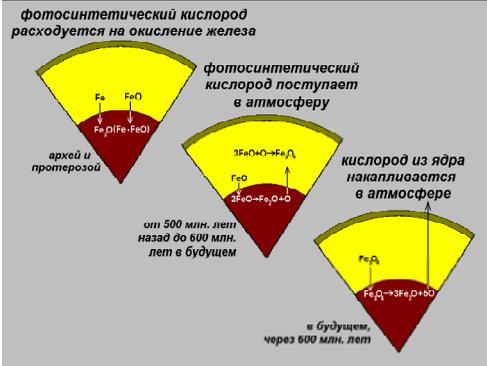
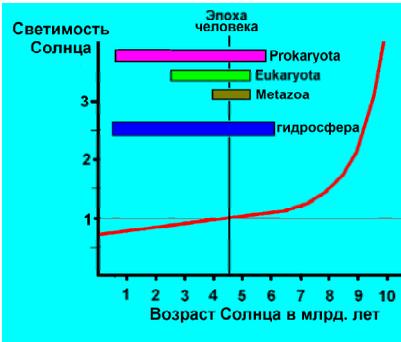


Планетарная туманность, в которую превращаются звёзды типа нашего Солнца

(порядка 10^{17} кг/м³). Нейтронная звезда очень быстро вращается и излучает узко направленный радиолуч, который с произвольного направления регистрируется как импульсное радиоизлучение. Поэтому такие звёзды ещё называют пульсарами. Когда в конце 1960-х гг. такие импульсы были обнаружены, все газеты кричали о том, что открыта связь с межзвёздной цивилизацией. Самый знаменитый пульсар – в Крабовидной туманности. Сама туманность образована оболочками звезды, сброшенными в 1054 г., как датировано китайскими астрономами. Наше Солнце ожидает другая судьба. После того, как оно выгорит и сбросит периферийные оболочки, на его месте образуется планетарная туманность со звездой-белым карликом в центре. Размером эта звезда будет с Землю. таких звёзд в нашей Галактике до 20%.

Но жизнь на нашей планете прекратится скорее всего задолго до этого вследствие, согласно теории Сорохтина–Ушакова, кислородной смерти. Действительно, формирование земного ядра вначале, в архее и протерозое, происходило за счёт опускания как самородного железа, так и оксидов железа. В центральных областях ядра формировался эвтектический сплав с общей формулой Fe_2O . На более поздних этапах, начиная с 500 млн лет назад, в составе верхних оболочек Земли почти не осталось самородного железа. При опускании оксида железа FeO в эвтектику выделяется кислород, который поднимается в мантию и окисляет там двухвалентное железо до магнетита ($3\text{FeO} + \text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$). В будущем, через 600 млн лет, после полного окисления всего мантийного железа до магнетита кислород из ядра уже не сможет задерживаться в мантии и начнёт выделяться в атмосферу. Через 800 млн лет давление кислородно-азотной атмосферы достигнет 5 атм, а приземная температура повысится до 76 °С. Это значит, что эукариотные организмы существовать не смогут, и биосфера вернётся к прокариотам. Через 1 млрд лет давление достигнет 15 атм, а температура 110 °С. Этого уже не вынесет и прокариотная жизнь. Через 1,5 млрд лет океаны полностью выкипят, давление повысится до 225 атм, а температура до 440 °С, начнётся диссоциация карбонатов и дегидратация пород земной коры (CaCO_3 превращается в негашёную известь, а углекислый газ поступит в атмосферу). Через 2 млрд лет давление достигнет 500 атм, а приземная температура 470 °С. Земля будет представлять собой раскалённую планету с высоким давлением в основном кислородной атмосферы. Через 5,5 млрд лет Солнце расширится до состояния красного гиганта, его светимость резко возрастёт. Но к этому моменту жизнь на планете уже закончится, а эпоха человека оказывается столь короткой, что её просто невозможно отобразить на графике.

Ну и наконец, наша звезда взрывается, превращается в белого карлика, и сброшенная оболочка, расширяясь, достигает Земли, сдувает её атмосферу и испаряет поверхностные слои земной коры вместе с ископаемыми остатками жизни и цивилизации. Вокруг злого белого карлика будет вращаться лишённая атмосферы камен-



ная оплавленная планета. Никакая экспедиция каких-нибудь воображаемых инопланетян не сможет обнаружить и следов когда-то существовавшей жизни.

Среди млекопитающих нет видов-долгожителей. Среднее время существования вида не превышает 1,5 млн лет. Так что селовек уже значительную часть своей истории прожил. Я предполагаю, что любая цивилизация погибает, исчерпав источники своего существования. Но человек большую часть своей истории существовал не в цивилизованном виде, а просто как вид животного. Наверное, и после гибели цивилизации человек просуществует некоторое время в виде примитивного охотника, но следующий ледниковый период ему пережить вряд ли удастся.

