

Раздел 2. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЖИЗНИ

Глава VI. Возникновение и развитие жизни на Земле

Сложность организации живых организмов и их необыкновенное разнообразие всегда поражали воображение людей. Как возникла жизнь во всем ее многообразии? Почему живые организмы удивительным образом соответствуют тем условиям, в которых они обитают? Попытки ответить на эти и многие другие вопросы предпринимались неоднократно и не только учеными.

§42. Гипотезы о происхождении разнообразия жизни на Земле

Существует несколько гипотез о происхождении разнообразия жизни на Земле, в разной мере подкрепленных фактами. Их можно разделить на две группы.

Первая группа гипотез основана на том, что живущие на Земле виды неизменны. Они либо существовали всегда, либо были созданы сверхъестественными силами в определенное время.

Вторая группа гипотез предполагает, что наблюдаемое нами многообразие видов живых организмов появилось в результате длительной эволюции. А первые организмы, заселившие Землю, были примитивными. Они либо были созданы Богом, либо были занесены на Землю из космоса, либо возникли из неживого благодаря сочетанию тех природных условий, которые в то время были на нашей планете. Последнюю гипотезу подтверждают некоторые эксперименты.

Немногочисленные сторонники гипотезы **стационарного состояния** считают, что и Земля, и жизнь на ней никогда не возникали, а существуют вечно, основываясь на представлениях, что живое может произойти только от живого (**биогенез**). Виды живых организмов, по их мнению, могут вымирать или изменять свою численность, но не могут меняться.

Сторонники **креационизма** (лат. creatio - создание) полагают, что мир в его разнообразии был создан Богом (или богами) по заранее продуманному плану. Доказательством этому они считают видимую целесообразность устройства живых организмов и их сообществ, хорошую приспособленность к условиям, в которых они находятся.

Эти представления зародились очень давно. Практически все религиозные учения утверждают, что человек и все другие живые существа созданы Богом. Виды сразу были совершенными и всегда

останутся такими, какими они были созданы. Никаких доказательств, что это так, не существует. Это вопрос веры.

Вместе с тем постепенное накопление данных о разнообразии живых существ, в том числе вымерших, привело к появлению и распространению эволюционных представлений, т.е. идеи о постепенном изменении, развитии разных живых организмов, в том числе о происхождении одних видов от других.

Уже древнегреческие мудрецы (Гераклит Эфесский, Платон, Эмпедокл и др.) начали обсуждать эволюционную идею. К ней неоднократно обращались мыслители XVIII века (англичанин Эразм Дарвин, француз Жорж Бюффон, наш соотечественник Афанасий Авакумович Каверзнев и др.). Это побуждало сторонников Божественного творения постепенно совершенствовать свои взгляды.

Так, в XIII веке крупнейший богослов Фома Аквинский считал, что сотворение мира - это постепенное развертывание возможностей, заложенных творцом.

Шведский естествоиспытатель Карл Линней, развивая идею еще одного знаменитого древнего грека - Аристотеля о "лестнице" (т.е. о какой-то упорядоченности) живых существ, попытался упорядочить представления о разнообразии известных к тому времени животных и растений и предложил использовать для этого иерархическую классификацию (§21). Линнеевские принципы классификации живого оказались настолько удачными, что используются до сих пор. Однако в их основе лежит представление о соответствии всех особей одного вида какому-то типичному организму и изменчивость не принимается во внимание. Поэтому долгое время эти идеи использовали для подтверждения того, что все разнообразие видов создано в результате акта творения и с тех пор виды остаются неизменными.

Некоторые современные последователи креационизма используют существование очень сложных, разнообразных молекулярно-генетических процессов у живых существ как аргумент в пользу неслучайности их появления. Другие же согласны с существованием эволюционного процесса, но считают, что само начало эволюции было связано с актом творения.

Гипотеза **панспермии** (греч. pan - всё и сперма) не предлагает решения проблемы происхождения жизни во Вселенной, а объясняет только появление ее на нашей планете занесением из космоса. Действительно, с одной стороны, известно, что некоторые микроорганизмы, а особенно их споры, могут сохранять жизнеспособность при очень жестких воздействиях. С другой стороны, при изучении метеоритов и комет обнаруживают небольшие органические молекулы, однако никаких форм жизни на них не найдено.

Гипотеза **абиогенеза** предполагает возникновение жизни на нашей планете около 4 миллиардов лет назад в тех условиях, которые тогда существовали, в результате нескольких длительных этапов эволюции:

- абиогенный синтез простых органических соединений;

- образование биополимеров;
- установление связей между биополимерами;
- возникновение мембран, отделяющих первые подобия живых организмов - **пробионтов**, или протобионтов, - от окружающей среды;
- появление способности к самовоспроизведению;
- формирование экологических связей и образование первых экосистем.

Гипотеза абиогенеза основывается на данных современной науки о формировании Земли не менее 4,5-5 миллиардов лет тому назад.

После появления нашей планеты как твердого тела и ее постепенного остывания увеличивалась мощность земной коры, причем ее поверхность, очевидно, была изначально неровной - с впадинами и повышениями. Во впадинах накапливалась вода с растворенными в ней веществами.

Тогдашняя атмосфера значительно отличалась от современной: в ней почти полностью отсутствовал кислород, но значительно большей была доля углекислого газа, а, кроме того, в значительных количествах присутствовали сероводород, метан, аммиак, пары воды и, возможно, некоторые другие газы. Так как отсутствовал кислород, то не было и озонового слоя. Естественно, жесткая часть ультрафиолетового излучения солнца достигала поверхности Земли.

Среда в целом была насыщена энергией.

Для образования или разрыва химических связей были важны следующие источники:

Жесткое ультрафиолетовое излучение (длина волны <200 нм)	1721 кДж/м ² .год
Электрические разряды	168
Естественная радиоактивность	117
Ударные волны разного происхождения	46
Солнечный ветер	8
Вулканическая деятельность	6

Американские исследователи Стэнли Миллер и Гарольд Юри в экспериментах показали, как в далеком прошлом могли появляться биологически важные химические соединения. Они подобрали разные газы в соотношении, близком к составу древней атмосферы, и пропускали через эту смесь искровые разряды. В результате получались такие биологически важные соединения, как муравьиная и молочная кислоты, мочевины и аминокислоты (глицин, аланин, глутаминовая кислота, аспарагиновая кислота) (рис. 42 - 1). Подобные опыты ставились неоднократно. Их результаты в целом были однотипными.

Многие аминокислоты, входящие в состав белков, найдены как в продуктах вулканических извержений, так и в некоторых метеоритах.

Воды на поверхности и непосредственно под поверхностью Земли насыщались подобными веществами (часто такой раствор называют "**первичным бульоном**"). Состав и концентрация органических веществ зависели от окружающих условий и, вероятно, были разными в разных частях поверхности Земли.

Часть образовавшихся органических веществ разрушалась. Однако другая часть могла концентрироваться, например, в минеральных глинах, образуя полимеры. Жирные кислоты, соединяясь со спиртами, могли образовывать липидные пленки на поверхности водоемов.

В экспериментах показано, что нагревание смеси аминокислот приводит к образованию достаточно длинных полипептидов со случайной последовательностью мономеров. Некоторые из этих полипептидов обладают каталитической активностью.

Как могли возникать связи между разными биополимерами и другими веществами? Этому, возможно, способствовала изоляция небольших объемов, например, при образовании пузырьков из липидных пленок (так называемые **коацерваты**, от лат. coacervus - сгусток) либо из пептидов (**микросферы**). Роль коацерват исследовалась нашим соотечественником Александром Ивановичем Опариным и его английским коллегой Джоном Холдейном. Микросферам были посвящены исследования американского ученого Сиднея Фокса. Изоляция могла осуществляться и иными способами - например, в полостях глин.

Как пробионты приобрели способность к саморепродукции, т.е. способность к воспроизведению структуры макромолекул? На этот вопрос ответа в настоящее время нет.

В химическом эксперименте удалось получить олигорибонуклеотиды, которые без участия ферментов могут строить комплементарные РНК-копии, т.е. обладают ограниченной способностью к воспроизведению. Открытие в 1982 году каталитической активности некоторых молекул РНК позволяет предполагать, что именно молекулы РНК были первыми биополимерами, в которых способность к репликации сочеталась с ферментативной активностью.

Можно предполагать, что на начальных этапах развития жизни на Земле появилось очень большое разнообразие пробионтов с совершенно разным устройством. Многие из них включали соединения, не характерные для большинства современных живых существ. Об этом свидетельствует огромное разнообразие экологических и биохимических особенностей сохранившихся до настоящего времени прокариот. Далеко

не все из них выжили, некоторые линии исчезли в результате конкуренции за органические вещества, поглощаемые из окружающего первичного бульона, другие же в результате случайных процессов. Ясно, что наилучшие возможности для выживания и размножения были у тех пробионтов, которые обладали мембраной, защищавшей их от воздействия внешней среды, и более эффективными способами получения веществ и энергии из окружающей среды.

Уже на этом этапе могло появиться хищничество и другие формы связей между видами, т.е. первичные сообщества.

В начале биологической эволюции источником питания, очевидно, служили запасы органических веществ, созданных абиогенным путем. Когда эти запасы истощились, то преимущества в размножении должны были получить те организмы, у которых появились возможности автотрофного питания, и хищники, их поедающие.

Распространение пробионтов, да и просто биологически важных полимеров и олигомеров, ограничивалось жестким ультрафиолетовым излучением, проникавшим в открытые водоемы на глубины до 5-10 м.

Именно поэтому можно предполагать, что начальные этапы становления жизни на Земле происходили в какой-то закрытой среде (или средах). Например, в пещерах, пластах глины, под ледниками.

В любом случае 3,4-3,2 миллиарда лет тому назад живые существа, в первую очередь прокариоты, были уже распространены очень широко. Об этом свидетельствуют как их остатки (правда, относительно немногочисленные), так и следы жизнедеятельности, например, появившиеся в результате деятельности прокариот известняки (§43). В ходе дальнейшей эволюции возникли эукариоты.

Гипотеза спонтанного **самозарождения жизни**, появившаяся еще до новой эры и существовавшая параллельно с креационизмом, постулировала возможность возникновения жизни абиогенным путем не только в далеком прошлом. Ее сторонники считали, что условия, необходимые для возникновения жизни имеются и в настоящее время. Появление личинок мух в гниющем мясе, а когда были открыты микроорганизмы, микробов - в различных питательных средах объясняли самозарождением. Потребовалось много лет, чтобы доказать невозможность самозарождения жизни в современных условиях. Эксперименты, в которых самозарождение не происходило после того, как питательная среда подвергалась кипячению, после чего сосуд с нею сразу же запечатывали, не являлись убедительными. Считалось, что кипячение убивает "жизненную силу" или необходимое для

самозарождения "активное начало"; кроме того, в закрытый сосуд не может проникнуть необходимый для жизни воздух и т.д.

Решающими оказались эксперименты известного французского биолога и химика Луи Пастера (рис. 42 - 2). Он поместил питательный раствор в колбы, горлышко которых было изогнуто, но не запечатано. После кипячения питательный раствор в течение долгого времени оставался стерильным, хотя воздух в сосуды проникал, но микроорганизмы оседали на сгибе горлышка и не могли попасть в раствор до тех пор, пока не отломали горлышко колб.

Вопросы

- Какие химические элементы должны были входить в состав пробионтов?
- Как вы думаете, почему невозможно зарождение пробионтов в современных условиях?

§43. Эволюция жизни на Земле. Палеонтологическая летопись

При анализе пластов осадочных пород исследователи обнаруживают остатки живых организмов и продукты их жизнедеятельности. Чаще всего в ископаемом состоянии находят окаменевшие остатки живых организмов и их отпечатки. Определив возраст пласта и сопоставив его с найденными в нем остатками животных и растений, можно составить **палеонтологическую летопись** (от греч. palaios - древний), т.е. последовательность, в которой живые организмы появлялись и исчезали на нашей планете. Палеонтологические данные являются важным свидетельством эволюции жизни на Земле. Они показывают, что примитивные формы жизни были распространены на нашей планете задолго до более сложно организованных, и подтверждают, что история жизни – это смена одних групп живых организмов другими.

На протяжении первых миллиардов лет на Земле существовали экосистемы, представленные только прокариотами. Одним из наиболее важных результатов их существования было выделение свободного кислорода в атмосферу. Так сформировались условия, благоприятные для живых существ, получающих энергию за счет полного окисления углеводов. Вероятно, это способствовало появлению эукариот. Считается, что их появление произошло в результате симбиоза разных представителей прокариот.

Следующий важнейший этап в эволюции жизни на Земле был связан с появлением и распространением многоклеточных эукариот. Нарастание их разнообразия происходило постепенно, в несколько этапов. До начала кембрийского периода (примерно 550-570 млн. лет тому назад) встречались

преимущественно бесскелетные формы. Начало кембрия – время становления огромного разнообразия скелетных форм. Считается, что оно даже превышало современное.

Примерно 400 миллионов лет тому назад началось освоение суши эукариотами. Появились первые наземные экосистемы, близкие по организации современным. Это совпало с формированием мощного озонового экрана.

Наконец, принципиально важным было появление примерно 40 тысяч лет тому назад человека разумного – вида, деятельность которого привела к крупнейшим изменениям, как в большинстве местных экосистем, так и биосфере в целом.

Как правило, палеонтологи находят остатки тех организмов, которые были многочисленными и широко распространенными в свое время. Крупные организмы крайне редко удается обнаружить в целом виде. Обычно сохраняются только отдельные части, по которым воссоздается целый организм.

Лучше всего остатки животных и растений сохраняются на дне водоемов, где они покрываются осадком и меньше разрушаются. Ясно, что в одном каком-то месте невозможно найти пласты, отражающие всю историю Земли. Обычно это отдельные находки, в которых сохранились ископаемые остатки определенного промежутка времени. Данные палеонтологии можно представить как фрагменты книги, в которой многие страницы утеряны.

Возраст анализируемых образцов сейчас обычно определяют по содержанию продуктов радиоактивного распада и таким образом устанавливают хронологическую последовательность появления и исчезновения различных групп живых организмов. Объединив данные, полученные палеонтологами по всему земному шару, составили историю развития жизни на нашей планете (см. форзац). Ее принято разделять на зоны, эры, периоды (и эпохи). Периоды часто называют в честь мест, где были сделаны первые находки. Периодизация событий прошлого во многом условна. Границы между зонами, эрами, периодами, эпохами обычно устанавливаются по резким сменам в составе живых существ.

Остатки прокариотических организмов в осадочных породах обнаружить трудно, обычно об их существовании судят по следам их деятельности, например, известнякам. О появлении автотрофных фотосинтезирующих организмов судят по тому, что атмосфере первобытной Земли появляется свободный кислород. Его содержание в атмосфере начинает превышать количество, затрачиваемое на неорганическое окисление, и 2,5-2,2 миллиарда лет тому назад достигает

1% от его современного (так называемая точка Пастера - в честь Луи Пастера). Это должно было способствовать широкому распространению консументов и редуцентов, использующих для получения энергии окисление, а не брожение.

Судя по всему, экологическое и биохимическое разнообразие прокариот было чрезвычайно велико. Среди них, были, например, формы, строившие так называемые **строматолиты** (греч. stroma -подстилка, lithos - камень) - очень широко распространенные в прошлом рифоподобные образования. Современные строматолиты создаются в результате деятельности очень своеобразных прокариотных экосистем, включающих разные группы продуцентов (в том числе существующих за счет фотосинтеза, в котором донором электронов является вода), консументов и редуцентов. Важно, что в таких экосистемах образуется кислород и формируется карбонат кальция и нередко сера.

Можно предполагать, что на протяжении не менее 2 миллиардов лет в состав экосистем входили только прокариоты. Именно они создали основу для развития эукариот.

Первые достоверные остатки одноклеточных эукариот найдены в отложениях возраста 1,5-1,3 миллиарда лет. Но очевидно, что появились они гораздо раньше, так как в отложениях примерно того же возраста обнаружены и остатки предположительно многоклеточных эукариот, в том числе настоящих водорослей и просто устроенных животных. Вероятно, еще долгое время (по крайней мере, до полного освоения суши эукариотами) среди продуцентов полностью господствовали прокариоты.

Начало становления разнообразия многоклеточных животных приходится на вендский период (см. форзац). В то время были представлены почти исключительно бесскелетные формы, главным образом кишечнополостные. Но среди таких животных, судя по всему, были и существа, близкие к членистоногим и плоским червям.

Начало кембрийского периода - это время появления огромного количества скелетных форм многоклеточных животных (рис. 43 - 1) и одноклеточных эукариот, причем представлены все основные химические типы скелетов - карбонатные, фосфатные, кремневые и хитиновые. Но почти все многоклеточные животные были мелкими - обычная их длина составляла миллиметры или несколько сантиметров.

Скелеты, даже плохо развитые, благоприятствовали быстрому перемещению - к скелетным структурам крепится мускулатура, поддерживали форму тела и защищали от врагов. Фактически в кембрии появились почти все основные группы современных животных (на уровне типов и даже классов).

В следующем периоде - ордовикском - наиболее примечательным было появление сравнительно крупных животных, таких как головоногие моллюски (в частности знаменитые аммониты) (рис. 43 - 2) и близкие к хелицеровым ракоскорпионы (до 2 м в длину), которые могли быть активными хищниками. Появляются бесчелюстные позвоночные. В то время, возможно, были предприняты первые попытки освоения суши эукариотами, но начавшееся мощное оледенение прервало этот процесс. Следы ордовикского оледенения сохранились на огромных территориях в Южной Америке и Северо-Западной Африке.

В силурийском периоде (см. форзац) появились челюстные рыбы (рис. 43 - 3) и разнообразные крупные членистоногие. Наиболее же важное событие конца этого периода - выход растений на сушу. Первые примитивные наземные растения были небольшими, вероятно, еще земноводными, но уже обладали проводящей системой (рис. 43 - 4).

Только в девонском периоде наземные растения стали разнообразными и широко расселились по поверхности суши. Возможно, этому способствовало формирование мощного озонового экрана. Появились плаунообразные, хвощеобразные и папоротникообразные. К концу девона высота наземных растений достигает 8-20 метров. Вместе с тем явно сохранялась их связь с влажными условиями, так как одна из стадий их жизненного цикла требовала обязательного присутствия свободной воды. Но в самом конце девона появились первые представители голосеменных растений, свободные от такой зависимости. Вслед за развитием наземных растений сушу осваивали и животные - многоножки, хелицеровые (например, скорпионы), амфибии (рис. 43 - 5).

В каменноугольном периоде (карбоне) огромные территории на суше занимали заболоченные высокостовольные леса с преобладанием различных плаунообразных (рис. 43 - 6), хвощеобразных, папоротникообразных и голосеменных. Последние были особенно многочисленны в высоких широтах. В то время появились первые рептилии, многие современные группы настоящих насекомых, хелицеровых, а также легочные моллюски.

В последнем периоде палеозоя - пермском - возрастало разнообразие многих наземных групп, но особенно заметным это было для групп, приспособленных к существованию в холодном и прохладном климате, - ведь значительная часть пермского периода приходится на мощное оледенение. Но в самом конце перми многие виды живых существ вымирают. Полностью исчезают трилобиты, четырехлучевые кораллы, многие представители головоногих, земноводных и

пресмыкающихся. Пермское вымирание считается одним из крупнейших в истории жизни на Земле.

Следующая эра - мезозой - это время господства рептилий. Часто говорят, что это - век динозавров (рис. 43 - 7). Конечно, в мезозое массовыми были не только динозавры, а по биомассе они, по-видимому, уступали многим другим группам, даже многоклеточных животных, не говоря уж о растениях и прокариотах. Среди динозавров и близких к ним крупных рептилий были многочисленны как растительноядные, так и хищные виды. Некоторые из них, вероятно, отличались элементами социального поведения и были способны издавать звуки.

Морские экосистемы мезозоя изменились незначительно по сравнению с палеозойскими, хотя произошла естественная смена части групп живых существ.

В первом периоде мезозоя - триасе (см. форзац) - происходит становление разнообразия крупных рептилий, среди них появляются специализированные водные обитатели, а также летающие ящеры. Пресмыкающиеся имели преимущество перед земноводными в ставших обычными в триасе засушливых районах. Среди других групп животных надо отметить появление таких совершенных отрядов насекомых, как двукрылые и перепончатокрылые. Начали попадаться и мелкие примитивные млекопитающие.

В следующем периоде - юрском - разнообразие крупных пресмыкающихся достигло максимума. Один из недавно описанных видов юрских динозавров весил до 100 тонн и был до 50 м в длину. В отложениях того времени обнаружены и первые достоверные остатки птиц, явно представляющих собой боковую ветвь пресмыкающихся (рис. 43 - 8).

В меловом периоде в морских экосистемах происходил так называемый планктонный взрыв, связанный с резким увеличением разнообразия и продуктивности планктонных одноклеточных фотосинтезирующих и гетеротрофных эукариот, в первую очередь кокколитофорид (рис. 43 - 9). Результатом их многовековой активности являются толщи природного мела.

Накопление отмерших и гибнущих одноклеточных эукариот на дне морей и океанов благоприятствовало существованию разнообразных илоедов, в том числе роющих, и фильтраторов.

На суше в меловом периоде появились покрытосеменные (цветковые) растения, которые к его середине уже распространились очень широко. Этому явно благоприятствовало более совершенное

размножение и обычно богатое запасными питательными веществами семя.

С развитием покрытосеменных были связаны и перемены в мире насекомых: бурно эволюционируют группы, жизненно ориентированные на цветковые растения, такие как нектарофаги-опылители. Появляется довольно много птиц, а также плацентарные млекопитающие.

Конец мелового периода связан с одним из самых знаменитых вымираний в истории нашей планеты. Исчезли все динозавры, хотя надо отметить, что некоторые группы крупных рептилий (например, крокодилы) сохранились.

В морских экосистемах вымерли такие головоногие, как аммониты и белемниты, а также большинство планктонных фораминифер, многие двустворчатые моллюски и иглокожие.

Палеонтологи нередко сталкивались со случаями массового вымирания живых организмов, которые до этого длительное время существовали без изменений. В начале XIX века французский зоолог и палеонтолог Жорж Кювье создал **теорию катастроф**, которая объясняла смену форм живых организмов в истории Земли результатом периодически происходящих катастроф. Сторонники этой теории, признавали, что виды, приходящие на смену вымершим, часто оказываются устроены более сложно, но отвергали их происхождение от предковых форм. Они считали, что новые виды возникают после катастроф в результате повторных "актов творения".

Вымирание конца мела наиболее часто обсуждается с точки зрения: что было его основной причиной? Однако надо помнить, что, во-первых, вымирание было не одномоментным процессом, а, по-видимому, охватывало до нескольких миллионов лет. Во-вторых, оно коснулось не только динозавров, но и других живых существ, в том числе и морских. В-третьих, вымирания в разных частях земного шара и для различных групп происходили со сдвигами по времени.

Для объяснения мелового вымирания предлагалось множество гипотез - вплоть до вирусной эпидемии среди динозавров. Одна из последних и наиболее популярных - падение огромного астероида (или кометы) в Центральной Америке и вызванные им пожары, цунами и выброс больших объемов иридия. В любом случае меловое вымирание явно было связано с существенными перестройками на экосистемном уровне.

Современная эра - кайнозой - отличается господством на суше семенных растений и высоким разнообразием млекопитающих и птиц. В целом на протяжении кайнозоя происходит постепенное ухудшение климатических условий по всей поверхности Земли.

В палеогене (см. форзац) в морских экосистемах высокого разнообразия достигли фораминиферы и моллюски. На суше в то время происходило становление разнообразия млекопитающих, в том числе

насекомоядных, приматов и копытных. В конце этого периода появляются первые грызуны.

В неогене началось формирование покровного оледенения в приполярных широтах и горного оледенения в высоких горных массивах. Вероятно, наиболее интересное событие этого периода - появление и эволюция высших приматов, приведшее к появлению рода человек (см. §49).

В четвертичном периоде (или антропогене) - неоднократно формировались мощные покровные оледенения, достигавшие в Европе 50° северной широты, а в Северной Америке - даже 40° . Еще более широкое распространение получила многолетняя мерзлота. В морских и особенно наземных экосистемах происходили резкие перестройки. Резко сокращалось разнообразие теплолюбивых форм и расселялись холодоустойчивые виды. В конце последнего оледенения (примерно 12-11 тыс. лет тому назад) вымерли многие крупные и холодоустойчивые млекопитающие - мамонты, ряд видов мускусных быков, бизонов, носорогов, оленей, лошадей и т.п. (рис. 43 - 10).

Еще одно замечательное событие четвертичного периода - это появление (примерно 40 тыс. лет тому назад) вида человек разумный, дальнейшая деятельность которого привела к значительной перестройке большинства экосистем и сейчас хорошо проявляется даже на уровне всей биосферы.

Вопросы

- Какие условия, по вашему мнению, должны быть соблюдены для того, чтобы ископаемые остатки живых организмов могли быть обнаружены и использованы для составления палеонтологической летописи?
- Сколько лет существуют на Земле эукариоты? Многоклеточные? Позвоночные? Млекопитающие? Высшие приматы? Человек? Голосеменные? Покрытосеменные растения?

§44. Эволюция жизни на Земле. Морфологические, молекулярно-генетические и географические данные

Анализируя ископаемые остатки организмов, можно наблюдать изменения в эволюции как общего строения родственных организмов, так отдельных признаков признака. Степень сходства или различия отражает степень филогенетического родства.

К сожалению, не все группы живых организмов хорошо представлены в палеонтологической летописи. Поэтому нередко для установления **филогенетических связей** (греч. phylon – род, племя и genesis – происхождение) сравнивают признаки современных видов. Так, у млекопитающих обычно сравнивают строение скелета, количество, расположение и устройство зубов, у насекомых – расположение жилок на крыльях, у покрытосеменных – строение цветка.

Широкое распространение получил метод изучения молекулярных особенностей организмов, особенно сравнительный анализ нуклеотидных последовательностей. Это универсальный признак, который есть у всех живых организмов.

Об эволюции видов и других таксонов свидетельствуют также географические данные: чем раньше и полнее произошла изоляция островов или материков, тем сильнее различаются заселяющие их живые организмы. Острова, никогда не соединявшиеся с континентами, отличаются отсутствием одних групп и необычайно высоким разнообразием других.

Среди первых исследований, показавших преемственность видов, сменяющих друг друга на Земле, были работы Владимира Онуфриевича Ковалевского. По ископаемым остаткам он установил историю возникновения современной лошади.

Далеким предкам современной лошади лет назад жили в лесах и были мелкими всеядными животными с пятипалыми конечностями. Затем, примерно 50 миллионов по мере уменьшения площади лесов в результате установления более сухого климата, они стали распространяться в степи. Постепенно они стали крупнее, сменился их образ жизни, они перешли на травоядное питание. Эти изменения можно было проследить по изменению их конечностей, черепов, зубов и т.д. Современные представления об эволюции лошади отражены на рис. 44 - 1.

Родственные отношения между видами выявляются и при сравнении строения **гомологичных органов**, т.е. органов, имеющих общее происхождение. Хотя у разных видов они могут быть приспособлены к выполнению различных функций и претерпевают некоторые изменения, тем не менее, их сходство легко обнаруживается (рис. 44 - 2). В противоположность этому **аналогичные органы**, выполняя одинаковую функцию, могут очень сильно различаться по строению, т.к. имеют самое разное происхождение. Пример тому крылья насекомых и крылья птиц, которые возникли независимо в разных группах животных.

Сходство признаков близких видов обеспечивается сходством их генов, унаследованных от общего предка. Каждый ген может со

временем мутировать. У близких видов спектр мутаций оказывается похожим. Впервые это явление обнаружил у растений наш знаменитый соотечественник Николай Иванович Вавилов. Он назвал его **законом гомологических рядов наследственной изменчивости**. Н.И.Вавилов предполагал, что этот закон должен действовать и на животных. Позднее его предположение было подтверждено (см. § 51).

Единство происхождения позвоночных животных обнаруживается при изучении их зародышевого развития. Начальные стадии развития эмбрионов оказываются очень похожими у представителей различных классов (см. § 47).

Некоторые органы, унаследованные от предковых форм, могут потерять свою функцию, но сохраниться в недоразвитом состоянии. Это **рудиментарные органы** (лат. rudimentum - зачаток). К рудиментарным органам относят глаза у кротов и слепышей, живущих под землей, тазовые кости у китообразных (рис. 44 - 3), хвостовые позвонки у человека и т.п. Наличие рудиментарных органов также отражает происхождение одних видов от других.

Рудиментарные органы, если они есть, присутствуют у всех особей вида. Однако иногда зачаточные признаки встречаются лишь у некоторых особей. Это **атавизмы** (лат. atavus - предок). Их появление свидетельствует о том, что гены, ответственные за данный признак, существуют, но в норме они не работают. И лишь у некоторых особей, обладающих определенным генотипом, происходит включение этих генов. Другими словами, это явление, обратное неполной пенетрантности (§25). Известные примеры атавизма у человека - развитие хвоста или обильного волосяного покрова на всем теле.

Еще одним важным доказательством эволюционного происхождения видов является их географическое распространение. Многие родственные виды ограничены одним районом. В других местах могут жить их функциональные аналоги: например, колибри - в Южной и Центральной Америке и цветочницы на Гавайских островах.

Своеобразие растительного и животного мира Австралии, бросающиеся в глаза различия Южной и Северной Америки, с одной стороны, и сходство Северной Америки и Евразии, с другой, всегда обращало на себя внимание натуралистов. Учитывая особенности фауны различных районов, по предложению английского биолога Альфреда Уоллеса, выделяют **шесть зоогеографических областей**: Палеарктическую, Неарктическую, Неотропическую, Австралийскую, Индомалайскую и Эфиопскую (рис. 44 - 4).

Причина отличия их растительного и особенно животного мира, по видимому, кроется в истории нашей планеты. Так, геологи установили, что земная кора вместе с верхним слоем мантии состоит из отдельных плит. Эти плиты медленно движутся относительно друг друга. Учитывая скорость и направление движения, ученые рассчитали, что примерно 200 миллионов лет назад все

континенты были объединены в единый суперконтинент, который назвали Пангея. Постепенно континенты разъединялись. Австралия отсоединилась около 90-100 миллионов лет назад, когда еще не было высших плацентарных млекопитающих. В результате почти все экологические ниши на этом континенте заполнили сумчатые животные (рис. 44 - 5). Северная и Южная Америки соединились Панамским перешейком всего несколько миллионов лет назад, поэтому сходство их фауны, обеспеченное небольшим количеством видов-мигрантов, весьма незначительно. А Евразия и Северная Америка дольше всего сохраняли связь в районе Берингова пролива. Основываясь на сходстве их фауны, Палеарктическую и Неарктическую области часто объединяют в Голарктическую область.

Расчеты геологов, показывающие существование связей между континентами до определенного времени, палеонтологическая летопись и данные современного распространения видов хорошо дополняют друг друга. На основании этих представлений можно по особенностям фауны определять примерное время возникновения островов.

Молекулярные данные оказались также очень информативными для установления родственных связей между организмами. Во второй половине двадцатого века начали определять аминокислотные последовательности белков (см. §6), затем последовательности нуклеотидов в нуклеиновых кислотах.

Процедура определения нуклеотидных последовательностей в ДНК (она носит название **секвенирование**, от англ. sequence - последовательность) к концу XX века стала достаточно рутинной процедурой, позволившей определить последовательности сотни тысяч генов. Их анализ производится с помощью компьютерных программ.

Изменение последовательности нуклеотидов в результате замены, выпадений, вставок происходит с определенной частотой постоянно. Чем больший промежуток времени отделяет расхождение организмов от общего предка, тем более значительные различия последовательностей мы наблюдаем.

Когда проанализировали тысячи нуклеотидных последовательностей, выяснились некоторые закономерности их изменений в ходе эволюции. Прежде всего, оказалось, что разные последовательности меняются с различными скоростями. Наименее подвержены изменениям последовательности, возникшие в эволюции давно и широко распространенные в мире живого. Например, очень консервативны гены рибосомных РНК, гены гистонов. А с наибольшими скоростями меняются гены РНК-содержащих вирусов (§9), причем в первую очередь меняются участки, которые узнаются иммунной системой организма-хозяина.

Вирус иммунодефицита человека, например, меняется с огромной скоростью, так что выделяемый из крови больного вирус может значительно отличаться от

того, который послужил источником заболевания. Мутируя с высокой скоростью, вирус как бы "прячется" от иммунной системы.

Кроме того, в результате сопоставления молекулярных данных с палеонтологическими установлено, что скорость изменений последовательностей нуклеотидов различна в разное время. Так, гены глобинов позвоночных менялись наиболее интенсивно 400-500 миллионов лет назад, потом скорость уменьшилась, и последние 100-200 миллионов лет гены глобинов почти не менялись.

Высокая скорость изменений не всегда означает, что мутации происходят с более высокой частотой. Скорость спонтанного мутирования может оставаться и постоянной. Но подавляющая часть мутаций, как правило, снижает жизнеспособность их носителей, а 400-500 миллионов лет назад среди мутировавших генов глобинов оказались такие, которые давали их обладателям преимущества в размножении. Поэтому они распространялись с более высокой частотой, и таким образом происходила "фиксация", т.е. быстрое закрепление некоторых из мутантных вариантов.

Молекулярные данные дали интересные сведения о филогенетических связях организмов. Так, изучая последовательности генов рРНК, удалось сравнить очень далекие организмы: бактерии и эукариоты. Как и ожидалось, они очень сильно различаются, но, что оказалось достаточно неожиданным, эубактерии и архебактерии резко отличаются друг от друга (рис. 44 - 6). На основании этих исследований и, принимая во внимание другие их различия (§21), было предложено выделять два надцарства прокариот наряду с надцарством эукариот. Учитывая скорость изменения гена рРНК малой субъединицы рибосом, можно датировать время разъединения этих двух групп бактерий 3,5 миллиардов лет назад.

Как вы помните, рибосомы присутствуют не только в цитозоле, но и в таких клеточных органеллах, как митохондрии и хлоропласты (§§ 13,14,16). Рибосомы цитозоля и органоидов отличаются: в цитозоле они прежде всего крупнее, кроме того, синтез белка в цитозоле останавливается под действием одних ингибиторов, а в органеллах и у прокариот - других. Эти факты, а также то, что ДНК органелл имеет кольцевую форму, так же как и ДНК прокариот, в свое время заставили многих ученых поддержать идею о том, что митохондрии и хлоропласты появились в клетке в результате симбиоза. Считается, что это наиболее вероятный путь возникновения эукариот - установление жесткой и

обязательной связи между прокариотами, жившими вначале в симбиотических отношениях друг с другом.

Этот путь эволюции обычно называют **симбиогенезом**. Основной вклад в развитие представлений о роли симбиогенеза в эволюции принадлежит американской исследовательнице Линн Маргелис (Маргулис). Хотя впервые эта идея была высказана нашим соотечественником Андреем Сергеевичем Фаминцыным во второй половине XIX века, а сам термин был предложен несколько позже Константином Сергеевичем Мережковским.

Данные анализа нуклеотидных последовательностей генов рРНК (рис. 44 - б) еще раз подтверждают сходство эубактерий с митохондриями и хлоропластами, а, следовательно, и гипотезу симбиотического происхождения этих органоидов.

Вопросы

- Можно ли построить филогенетические деревья с участием про- и эукариот, используя иные, чем нуклеотидные последовательности генов, признаки?
- Вспомните курсы ботаники и зоологии и приведите примеры аналогичных и гомологичных органов.
- Какие события в эволюции позвоночных проходили 400-500 миллионов лет назад?
- Как вы думаете, у каких вирусов мутации идут с более высокой скоростью: ДНК- или РНК-содержащих?
- Учитывая материал этого параграфа, внесите изменения в рисунок 21 - 3.