

Глава 4. ГЛОБАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ И ЭВОЛЮЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО МИРА

В настоящее время геологическую историю Земли подразделяют на 4 крупных временных интервала, называемых эонами: катархей, архей, протерозой и фанерозой. Первые 3 из перечисленных эонов объединяют в понятие – докембрий. Каждый эон, за исключением катархея, подразделяется на эры. Эры в пределах протерозоя и фанерозоя подразделяются, в свою очередь, на периоды. Самый короткий, но наиболее изученный отрезок геологической истории – фанерозой, имеет более дробные, чем период, подразделения (эпоха, век, время). В данной главе будут в краткой форме рассмотрены современные представления об основных событиях геологической истории Земли и эволюции органического мира. Названия и временные границы геохронологических подразделений даны в соответствии с действующей Международной геохронологической шкалой. В конце главы приведены основные события геологической истории Земли в виде таблицы.

4.1. Катархей

Катархейский эон – интервал геологического времени, предшествовавший архею (рис.4.1). Считают, что в начале катархея, около 4.6 млрд. лет назад, образовалась Земля путем аккреции из протопланетного диска – дискообразной массы газа и пыли, оставшихся после образования Солнца. Изначально Земля была раскалена благодаря остаточному теплу и частым ударам астероидов и метеоритов. Но с течением времени её внешний слой остыл и образовал первичную земную кору. На поверхности Земли пока не обнаружено горных пород этого возраста.

В настоящее время не существует единой точки зрения на основные события катархея. Наиболее обоснованной считается гипотеза, согласно которой важнейшим событием этого отрезка истории Земли было ее столкновение с другой планетой (Тейя), по размерам сопоставимой с Марсом и массой около 10% земной. Предполагают, что это событие произошло около 4.4 млрд. лет назад. Столкновение происходило по касательной. В результате большая часть вещества ударившего объекта и часть вещества земной мантии были выброшены на околоземную орбиту. Из этих обломков образовалась прото-Луна, которая начала обращаться по орбите с радиусом около 60 000 км. Земля в результате удара получила резкий прирост скорости вращения (один оборот за 5-6 часов) и заметный наклон оси вращения. Свидетельствуют о таком столкновении собранные экипажами космических аппаратов «Аполлон» образцы лунных пород, которые по составу изотопов кислорода почти идентичны веществу земной мантии. Для объяснения дефицита железа на Луне приходится принимать допущение, что ко времени столкновения и на Земле, и на Тейе в основном уже произошла гравитационная дифференциация вещества с образованием тяжёлого железного ядра и более лёгкой силикатной мантии.

В результате катастрофического эпизода, связанного с образованием Луны, значительная часть коры и мантии прото-Земли должна была не только расплавиться, но и испариться. Со временем, испарившиеся горные породы конденсировались, а содержащиеся в них

ЭОН	ЭРА	ПЕРИОД	Млн. лет
ДОКЕМБРИЙ	Нео-протерозой	Эдикарий	541
		Криогений	635
		Тоний	720
	Мезо-протерозой	Стений	1000
		Эктазий	1200
		Калимий	1400
	Палео-протерозой	Статерий	1600
		Орозирий	1800
		Риасий	2050
		Сидерий	2300
	АРХЕЙ	Неоархей	2500
		Мезоархей	2800
		Палеоархей	3200
		Эоархей	3600
КАТАРХЕЙ		4000	
		4600	

Рис.4.1. Международная геохронологическая шкала докембрия.

летучие вещества, вероятно, образовали тяжелую атмосферу из паров воды, углекислого газа, аммиака, метана, водорода и других газов. В процессе дальнейшего охлаждения и конденсации водяного пара был образован первичный океан.

4.2. Архей

Архейский эон – один из четырёх главных эонов в истории Земли. Термин «архей» предложен в 1872 году американским геологом Дж. Дана. Архей продолжался от 4.0 до 2.5 млрд. лет назад. В это время на Земле ещё не было кислородной атмосферы, но появились первые простейшие анаэробные бактерии, которые сформировали многие ныне существующие залежи полезных ископаемых: серы, графита, железа и никеля.

Архей разделен на четыре эры: эоархей, палеоархей, мезоархей и неоархей. Границы между ними проведены хронометрически (по определённым моментам времени), а не стратиграфически (по определённым слоям пород).

Эоархей – первая геологическая эра архейского эона. Охватывает временной период от 4.0 до 3.6 миллиарда лет назад. В начале эоархея продолжалось частое падение на Землю астероидов и крупных метеоритов. Эоархей – первая эра, от которой сохранились древнейшие горные породы. Крупнейшей подобной формацией является формация Исуа на юго-западном побережье Гренландии, возраст которой оценивается в 3.8 млрд. лет.

В эпоху эоархея образовалась гидросфера Земли, однако воды на поверхности Земли было сравнительно немного и единого Мирового океана ещё не существовало, водные бассейны существовали изолированно друг от друга, при этом температура воды в них доходила до 90 °С. Атмосфера характеризовалась высоким содержанием CO₂ и низким содержанием азота. Кислород в атмосфере практически отсутствовал. Плотность и давление атмосферы были значительно выше современных. В конце эоархея началось формирование первого суперконтинента Ваальбара. К эоархею относятся самые древние строматолиты – ископаемые продукты деятельности цианобактериальных сообществ.

Палеоархей – вторая геологическая эра архейского эона. Охватывает временной период от 3.6 до 3.2 миллиарда лет назад. К концу палеоархея в основном завершилось формирование ядра Земли, вследствие этого напряженность магнитного поля Земли стала достаточно высока и составляла не менее половины современного. Это дало развивающейся жизни защиту от солнечного и космического излучений. Содержание кислорода на поверхности Земли постепенно повышалось в результате деятельности бактерий, но практически весь он поглощался в процессе окисления железосодержащих минералов. В палеоархее продолжалось формирование первого суперконтинента Ваальбара. В результате приливного воздействия Луны скорость вращения Земли постепенно замедлялась, и в палеоархее сутки равнялись приблизительно 15 часам.

Мезоархей – третья геологическая эра архейского эона истории Земли. Продолжалась от 3.2 до 2.8 миллиарда лет назад. В мезоархее большую часть поверхности планеты занимал неглубокий океан, который в ту эпоху имел зеленоватый цвет за счёт высокой концентрации растворённого двухвалентного железа, а также отличался высокой солёностью и температурой. Земля постепенно остывает и замедляет суточное вращение. Луна всё ещё находится близко к Земле, вызывая приливные волны до 300 метров высотой. Начиная с мезоар-



Рис.4.2. Образец железистого кварцита из Южной Африки возрастом 3.1 млрд. лет.

хей, происходит активное осаждение растворённого в океане железа, что приводит к формированию его отложений (железистых кварцитов) и к изменению состава морской воды. (рис.4.2). Этому способствует появление биогенного фотосинтеза.

Важнейшим событием мезоархей стало начало действия механизма тектоники плит (около 3 млрд. л.н.), что привело к росту вулканической активности, интенсивному росту континентальной коры (гранитного типа) и площади суши. Начался интенсивный тектогенез, в результате которого в течение последовавшего миллиарда лет объём континентальной коры (и, соответственно, приблизительная площадь суши) возросли в пять раз, достигнув в начале протерозоя приблизительно современного значения и стабилизировавшись на нём. Первые крупные континентальные блоки (кратоны) составили ядра континентальных литосферных плит. Вероятно, первым крупным участком суши в тот момент была Ваальбаара. Этот древнейший геотектонический объект раскололся не позднее конца мезоархей.

К середине мезоархей относится древнейший известный кратер (в Гренландии), оставшийся от столкновения Земли с крупным астероидом. Это событие произошло около трех миллиардов лет назад. Доминирующей формой жизни мезоархей оставались микробные сообщества. Строматолиты, найденные в Австралии, показывают, что в мезоархее на Земле уже существовали цианобактерии и мог начаться кислородный фотосинтез.

Неоархей – продолжался от 2.8 до 2.5 миллиарда лет назад. Эта эра относится к беломорскому циклу (эпохе) тектогенеза, в котором происходило формирование настоящей континентальной земной коры (*беломорская складчатость*).

В неоархее проявилась фотосинтезирующая деятельность цианобактерий, которая в самом начале следующей эры, палеопротерозое, стала причиной так называемой кислородной катастрофы.

4.3. Протерозой

Протерозой – геологический эон, охватывающий период от 2500 до 541 млн. лет назад (рис.4.1). Это самый длительный эон в истории Земли. Протерозой делится на 3 эры: палеопротерозой, мезопротерозой и неопротерозой. Границы между ними проведены хронометрически (по определённым моментам времени), а не стратиграфически (по определённым слоям пород), за исключением последнего периода неопротерозоя.

Палеопротерозой начался 2.5 миллиарда лет назад и продолжался до 1.6 миллиарда лет назад. Палеопротерозой разделен на четыре периода: сидерий (2.5 – 2.3 млрд.л.н.), риасий (2.3 – 2.05 млрд.л.н.), орозирий (2.05 -1.8 млрд.л.н.) и статерий (1.8 – 1.6 млрд.л.н.).

В начале палеопротерозоя (в сидерии) произошло одно из самых крупных вымираний простейших организмов – кислородная катастрофа, обусловленная фотосинтезирующей деятельностью цианобактерий. Почти все существовавшие тогда формы жизни были анаэробами, то есть обмен веществ в них зависел от форм клеточного дыхания, которые не требовали кислорода. Доступ кислорода в больших количествах губителен для большинства анаэробных организмов, поэтому с увеличением концентрации кислорода большая их часть на Земле исчезла. Оставшиеся формы жизни были либо невосприимчивы к окислению и губительному воздействию кислорода, либо проводили свой жизненный цикл в среде, лишенной кислорода. На начало этого периода приходится пик образования железистых кварцитов. Они формировались в океанах, где анаэробные водоросли производили кислород. Кислород, взаимодействуя с растворенным в океане железом, образовывал магнетит (Fe_3O_4), который выпадал в осадок. Этот процесс вычищал железо из океанов. В конечном итоге, когда океаны прекратили поглощать кислород, процесс привел к постепенному образованию насыщенной кислородом атмосферы.

В соответствие с естественной эволюцией звезд, энергия излучения Солнца в архее, протерозое и фанерозое увеличивалась примерно на 6% каждый миллиард лет, т.е. в начале геологической истории Земля получала заметно меньше солнечного тепла. Тем не менее,

благодаря плотной атмосфере, насыщенной углекислым газом и метаном, на Земле царили условия парникового эффекта и, за счет этого, сохранялись достаточно высокие температуры на ее поверхности. Увеличение концентрации кислорода в атмосфере в начале протерозоя привело к снижению содержания парниковых газов, прежде всего – метана. Соответственно, произошло ослабление парникового эффекта и снижение температуры на поверхности Земли. По-видимому, это явилось основной причиной возникновения наиболее длительного в истории Земли Гуронского оледенения (2.4-2.1 млрд. лет назад) и нескольких эпох глобального оледенения в позднем неопротерозое. Ледниковые отложения, найденные в Южной Африке, датируются 2.2 млрд. л.н., а палеомагнитные данные указывают на их положение в районе экватора. Таким образом, Гуронское оледенение, вероятнее всего, было глобальным. Некоторые ученые предполагают, что это и последующие протерозойские ледниковые периоды были настолько серьезными, что планета была полностью заморожена от полюсов до экватора. Эта гипотеза называется Земля-снежок.

В орозирийском периоде Земля испытала два крупнейших астероидных удара. В начале периода, 2023 млн. л. н., столкновение с крупным (диаметром около 10 км) астероидом привело к образованию астроблемы Вредефорт в Южной Африке (рис.4.3). Ближе к концу орозирия еще одно столкновение с астероидом подобного размера привело к образованию медно-никелевого рудного бассейна в Садбери (Онтарио, Канада).

К концу палеопротерозоя (статерийский период) сформировался суперконтинент Колумбия (Пангея-1). К этому же периоду относятся наиболее ранние достоверные свидетельства присутствия эукариот.

Палеопротерозой был временем выдающегося железорудного накопления в виде железистых кварцитов (Кривой Рог, Курская магнитная аномалия и др.). На юге Африки в это же время внедряются гигантские интрузии (Бушвельдский комплекс и другие похожие интрузии), с которыми связаны крупнейшие месторождения платины, палладия, хрома, титана, ванадия, золота, урана, осмия, иридия, родия, рутения.

Мезопротерозой – 1.6 – 1.0 млрд. л. н. Мезопротерозой разделен на три периода: калимий (1.6 – 1.4 млрд. л. н.), эктазий (1.4 – 1.2 млрд. л. н.) и стений (1.2 – 1.0 млрд. л. н.). Мезопротерозой характеризуется расширением существующих и появлением новых континентальных плит в результате формирования осадочного чехла на кратонах. В начале мезопротерозойской эры (калимий), около 1500 миллионов лет назад, распался суперконтинент Колумбия (Пангея-1), а в стении был образован новый суперконтинент – Родиния.

Предполагается, что в мезопротерозое объем и состав вод Мирового океана достигли значений, близких современным. В середине мезопротерозоя (в эктазии) появились первые многоклеточные организмы (красные водоросли), а к его окончанию (в стении) – другие виды многоклеточных водных растений и грибов.

Неопротерозой – 1000 – 541 млн. л. н. Разделен на три периода: тоний (1000 – 720 млн. л. н.), криогений (720 – 635 млн. л. н.) и эдиакарий (635 – 541 млн. л. н.). В начале неопротерозоя (в тоние) начался распад суперконтинента Родиния. В неопротерозое (в криогенее) отмечены сильнейшие (вплоть до экватора) оледенения Земли (гипотеза «Земля-снежок»). В этом же периоде началось формирование суперконтинента Паннотия. Этот суперконтинент существовал сравнительно недолго, и уже в следующем периоде (эдиакарие) он рас-

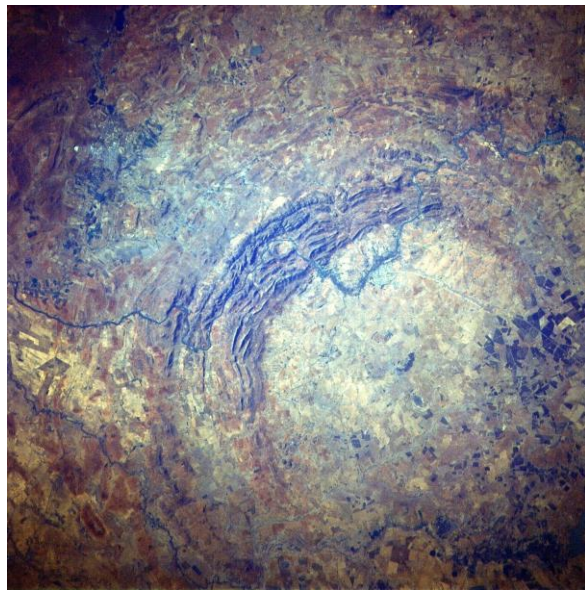


Рис.4.3. Кратер Вредефорт, снимок со спутника. Диаметр кратера около 250 км.

пался на крупные континенты Гондвану, Лавразию и более мелкие микроконтиненты. В неопротерозое во многих районах проявилась складчатость, которая получила название *байкальской*. Она охватила области к югу от Сибирской платформы, север Урала, в районе Тимана, и многие другие районы. Складчатые сооружения, возникшие в эту эпоху, спаялись с платформами и нарастили их, создав байкальские складчатые системы.

Важнейшей чертой неопротерозоя является широкое развитие достаточно сложных форм жизни. В криогенее появилась одна из древнейших фаун бесскелетных многоклеточных животных – *хайнаньская* макрофауна, большая часть представителей которой имели червеобразную форму. Несколько позднее, в эдиакарии, появляется новая



Рис.4.4. Образец горной породы с отпечатком эдиакарской фауны. Палеонтологический музей РАН.

группа эукариотов – бесскелетных организмов, насчитывающая свыше 30 разновидностей и получившая название *эдиакарской* фауны по наименованию рудника Эдиакара в Южной Австралии (рис.4.4). Фауна эдиакарского типа, систематическая принадлежность которой до сих пор не ясна, представлена медузоидами и аннелидами (кольчатыми червями), практически не имеющими ничего общего с последующей раннекембрийской скелетной фауной, среди которой не обнаружены возможные потомки эдиакарских форм. Возможно, что в это время в морской воде еще сохранялось повышенное содержание CO_2 , что не позволяло организмам выделять известь и строить скелет. В кембрийской фауне по существу нет потомков позднепротерозойской эдиакарской фауны. Это одна из палеонтологических загадок.

4.4. Фанерозой

Фанерозойский эон – время «явной» жизни. Этот эон начался с кембрийского периода, когда произошло резкое увеличение числа биологических видов и появились организмы, обладающие минеральными скелетами. Предшествующая часть геологической истории Земли называется криптозой, то есть время «скрытой» жизни, поскольку следов её проявления находят очень мало. Фанерозой делится на 3 эры: палеозойскую (541 – 252 млн. л. н.), мезозойскую (252 – 66 млн. л. н.) и кайнозойскую (66 млн. л. н. – наст. время).

Палеозойская эра

Палеозойская эра – известная как эра древней жизни, делится на 6 периодов: кембрий (541 – 485 млн. л. н.), ордовик (485 – 443 млн. л. н.), силур (443 – 419 млн. л. н.), девон (419 – 359 млн. л. н.), карбон (359 – 299 млн. л. н.) и пермь (299 – 252 млн. л. н.).

Тектоника. К началу эры и в течение всего кембрия древние платформы (Южно-Американская, Африканская, Аравийская, Австралийская, Антарктическая, Индостанская) были объединены в единый суперконтинент, называемый Гондваной. Этот суперконтинент располагался главным образом в южном полушарии, от южного полюса до экватора, и занимал общую площадь более 100 миллионов км². В Гондване находились разнообразные возвышенные и низменные равнины и горные массивы. Море периодически вторгалось лишь в окраинные части суперконтинента. Остальные меньшие по размерам материк находились в основном в экваториальной зоне: Лавразия, Сибирия и Балтика. Там же находились микроконтиненты: Китайский, Казахстанский и другие. В окраинных морях располагались многочисленные острова, окаймлённые низменными побережьями с большим числом лагун и дельт рек. Между Гондваной и другими материками был океан, в центральной части которого находились срединно-океанские хребты. В кембрии существовали две наиболее крупные плиты: целиком океаническая Прото-Кула и преимущественно материковая Гондванская плита.

В ордовике Гондвана, двигаясь на юг, вышла в район Южного географического полюса (сейчас это северо-западная часть Африки). Происходило пододвигание океанической литосферной плиты Прото-Фараллон (и вероятно Прото-Тихоокеанской плиты) под северную окраину Гондванской плиты. Началось сокращение Прото-Атлантической впадины (Япетус), расположенной между Балтийским щитом, с одной стороны, и единым Канадо-Гренландским щитом – с другой стороны. В течение всего ордовика происходит сокращение океанических пространств и закрытие краевых морей между материковыми фрагментами: Сибирским, Прото-Казахстанским и Китайским.

В палеозое (вплоть до силура — начала девона) продолжалась *Каледонская складчатость*. Типичные каледониды сохранились на Британских островах, в Скандинавии, Северной и Восточной Гренландии, в Центральном Казахстане, в Юго-Восточном Китае, в Восточной Австралии, в Кордильерах, Южной Америке, Северных Аппалачах, Среднем Тянь-Шане и других областях. В результате рельеф земной поверхности в конце силурийского периода стал возвышенным и контрастным, особенно на континентах, расположенных в северном полушарии. В раннем девоне происходит закрытие Прото-Атлантической впадины и образования Евро-Американского материка. В девоне смещение Гондваны продолжается, в результате юг современной Африки, а возможно и нынешней Южной Америки оказались в районе Южного полюса.

В карбоне произошло столкновение Гондваны и Евро-Америки. Несколько позднее, в пермском периоде, образовался новый суперконтинент Пангея-2. В конце девона началась грандиозная эпоха *Герцинской складчатости* с наиболее интенсивным проявлением при формировании горных систем Альп в Европе, сопровождавшимся интенсивной магматической деятельностью. В местах столкновения платформ возникли горные системы (высотой до 2000—3000 м), некоторые из них просуществовали и до нашего времени, к примеру Урал или Аппалачи. Южный географический полюс в это время находился в пределах современной Восточной Антарктиды. Входивший в состав Пангеи-2. Сибирский материк, являвшийся её северной окраиной, приближался к Северному географическому полюсу, не доходя до него 10 – 15° по широте. Северный полюс в течение всего палеозоя находился в океане. В это же время образовался единый океанический бассейн с главной Прото-Тихоокеанской впадиной и единая с ней впадина океана Тетис.

Климат. В начале кембрия на Земле господствовал в основном тёплый климат: средняя температура поверхности была сравнительно высокой, при небольшой разнице температур между экватором и полюсами. Основную массу атмосферы в начале кембрия составлял азот, количество углекислого газа достигало 0.3%, а содержание кислорода постоянно увеличивалось. В результате к концу кембрия атмосфера приобрела кислородно-углекисло-азотный характер. В ордовике и силуре концентрация кислорода в атмосфере постепенно повысилась до значений, при которых смог образоваться *озоновый слой*, эффективно защищавший поверхность Земли от губительного ультрафиолетового излучения Солнца. Это способствовало постепенному заселению живыми организмами участков суши. В начале позднего ордовика сильно похолодало. Южный полюс в это время находился на возвышенной суше Гондваны, в пределах которой возникли обширные покровные ледники. Во второй половине силурийского периода в высоких широтах климат вновь стал умеренно теплым, близким к субтропическому. К раннему карбону на планете стал господствовать тропический и экваториальный климат.

Увеличение объёма растительной биомассы на континентах привело к усиленному фотосинтезу с интенсивным потреблением углекислого газа (с двукратным уменьшением его содержания в атмосфере) и выделением кислорода в атмосферу. В результате образования большого суперконтинента Пангеи ограничилась связь экваториальных морских бассейнов с полярными. Эти процессы привели к наступлению похолодания, с более низкой средней температурой, резко выраженной климатической зональностью и значительной разницей температуры между экватором и полюсами. В результате в позднем карбоне и ранней перми мощный ледниковый щит покрыл Антарктиду, Австралию, Индию, южные

части Африки и Южной Америки (*гондванское оледенение*). Суша на Южном полюсе начала играть роль глобального холодильника. В северном полярном бассейне температура воды понизилась и вероятно, как и существующий ныне Северный Ледовитый океан, на какое-то время покрывался льдом. Ледниковый покров существовал сравнительно недолго, периодически отступая. В межледниковые эпохи климат становился умеренным.

Таким образом, в позднем карбоне и ранней перми происходило становление многих ландшафтно-климатических зон и климатических поясов, известных в настоящее время, и стала ярко выражена климатическая зональность. К концу перми влажный прохладный климат сменился на более теплый, в районах с умеренными условиями стал преобладать субтропический климат, сильно расширились пояса тропического и экваториального климата. Средние температуры тропических морей составляли 20 – 26 °С.

Фауна и флора. В кембрийском периоде основная жизнь была сосредоточена в морях и океанах. Организмы заселили всё разнообразие доступных мест обитания, вплоть до прибрежного мелководья и, возможно, пресных водоёмов.

Водная флора была представлена большим разнообразием водорослей, основные группы которых возникли ещё в протерозойскую эру.

Начиная с позднего кембрия постепенно сокращается распространение строматолитов. Это связано с возможным появлением растительноядных животных (возможно, какие-то формы червей) поедающих строматолитообразующие водоросли.

Донная фауна неглубоких тёплых морей, прибрежных отмелей, заливов и лагун была представлена разнообразными прикрепленными организмами: губками, археоциатами, кишечнополостными и другими (рис.4.5). Большинство из них питалось различными микроорганизмами (простейшие, одноклеточные водоросли и т.п.), которых они отцеживали из воды. Некоторые колониальные организмы (строматопоры, губки, табуляты, мшанки, археоциаты), обладающие известковым скелетом, возводили на дне моря рифы, подобно современным коралловым полипам. По морскому дну среди водорослей и кораллов ползали малоподвижные иглокожие (морские звёзды, офиуры, голотурии и др.) и моллюски с раковинками.

В кембрии появляются первые свободно плавающие головоногие моллюски – наутилоидеи. В девоне появились более совершенные группы головоногих (аммониты), а в нижнем карбоне возникли первые представители высших головоногих (белемниты), у которых раковина постепенно редуцировалась и оказалась заключённой в мягких тканях тела.

В кембрийских морях обитали и высокоорганизованные животные – членистоногие: жабродышащие, хелицеровые (паукообразные) и трилобиты (рис.4.6). Трилобиты достигли расцвета в раннем кембрии, составляя в это время



Рис.4.5. Фауна раннего палеозоя. Прикрепленные виды бентоса (губки и археоциаты).

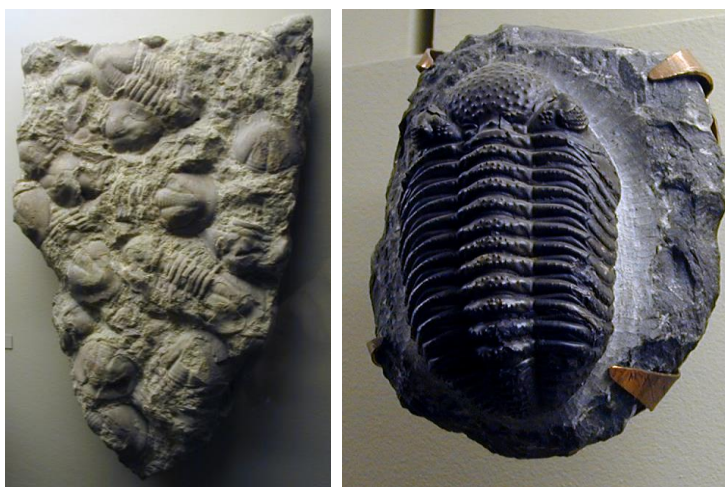


Рис.4.6. Раннепалеозойские трилобиты.

Трилобиты достигли расцвета в раннем кембрии, составляя в это время

до 60% всей фауны, и окончательно вымерли в пермском периоде. В кембрии появляются первые крупные (до 2-х метров в длину) хищные членистоногие эвриптериды, достигшие наибольшего расцвета в силуре и исчезнувшие в ранней перми, когда их вытеснили хищные рыбы. В ордовике и силуре в морях обитали головоногие хищные моллюски (наутилоидеи), с размером раковин до первых метров.

Начиная с нижнего ордовика в морях появляются первые позвоночные. Древнейшие известные позвоночные были рыбообразными животными, лишенными челюстей, с телом, защищенным панцирем. Первые из них относятся еще к верхнему кембрию (рис.4.7).

Древнейшие представители рыб появились в морях и пресных водоёмах раннего и среднего девона. Многие из них были одеты в сильно развитый костный панцирь (панцирные рыбы). К концу девона панцирные позвоночные вымирают, вытесненные более прогрессивными группами челюстноротых. В первой половине девона уже существовали разнообразные группы всех классов рыб, имеющие развитую челюсть, настоящие парные конечности и усовершенствованный жаберный аппарат. Некоторые из них сформировались во внутриконтинентальных пресных водоёмах, хорошо прогреваемых солнцем, обильно заросших водной растительностью и отчасти заболоченных. В условиях недостатка кислорода в воде у отдельных видов рыб возник дополнительный орган дыхания (лёгкие), позволяющий использовать кислород из воздуха.

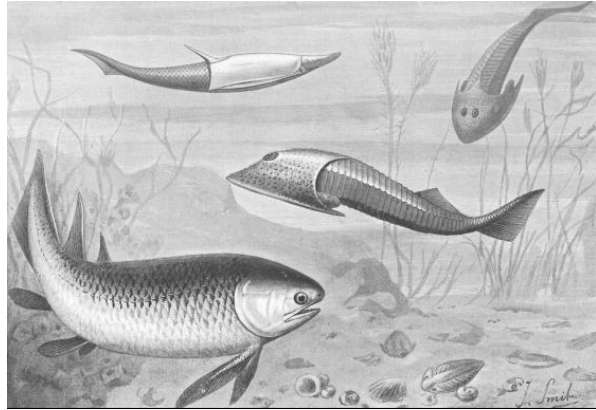


Рис.4.7. Рыбообразные раннего палеозоя.

Освоение суши, как среды обитания, могло начаться во второй половине ордовикского периода, когда содержание кислорода в земной атмосфере достигло достаточного для формирования озонового слоя уровня.

Заселение безжизненных прежде материков было длительным процессом, развивавшимся на протяжении ордовика, силура и девона. Первыми обитателями суши были растения, сначала заселившие мелководья у морских побережий и пресные водоёмы, а затем постепенно освоившие влажные местообитания на берегах. Древнейшими представителями этой наземной флоры были *псилофиты*, ещё не имевшие настоящих корней.

Заселение суши растениями положило начало почвообразованию с обогащением минерального субстрата органическими веществами. В раннем девоне от псилофитов возникли другие группы наземных сосудистых растений: *плауновидные*, *хвоцевидные* и *папоротниковидные*. Представители этих групп в позднем девоне повсеместно вытеснили псилофитов и сформировали первую настоящую наземную флору, включающую и древовидные растения. К этому времени относится и появление первых *голосеменных*. Во влажном и тёплом климате, характерном для первой половины каменноугольного периода, широкое распространение получила обильная наземная флора, имевшая характер густых влажных тропических лесов. Среди древовидных растений выделялись плаунообразные лепидодендроны (высотой до 40 м) и сигиллярии (высотой до 30 м), различные ползучие и древовидные папоротники.

По мере заселения суши растениями появились предпосылки для освоения наземной среды обитания животными. В карбоне на суше появляются растительноядные брюхоногие моллюски, дышащие воздухом. В раннем карбоне появились наделённые крыльями высшие насекомые.

В верхнедевонских отложениях Гренландии известны наиболее древние представители земноводных — *ихтиостеги* (рис.4.8). Они обитали в мелких прибрежных участках водоёмов, заболоченных районах и областях с избыточной влажностью на суше.

В карбоне начинается расцвет древних амфибий, представленных в позднем палеозое большим разнообразием форм, которых объединяют под названием *стегоцефалов* (рис.4.9). В пермском периоде появляются крупные крокодилообразные стегоцефалы. От них в раннем карбоне возникли настоящие рептилии, которые уже стали в полной мере наземными животными. Небольшие (длиной до 50 см) рептилии питались насекомыми. У них пропадает кожное дыхание.

Животный мир на протяжении пермского периода претерпел значительные изменения, ставшие особенно драматичными во второй половине перми. Численность многих групп морских животных уменьшилась (мшанки, морские ежи, аммоноидеи, наutilusы, остракоды, губки, фораминиферы и др.), как и их разнообразие, вплоть до полного вымирания целых классов (трилобиты, четырех лучевые кораллы и многие другие). Из позвоночных вымирают многие палеозойские группы хрящевых рыб. К концу перми вымирают стегоцефалы.

Пермское вымирание по масштабам принадлежит к категории «великих вымираний». В этот период вымерло 96% всех морских видов и 70% наземных видов позвоночных. Ввиду утраты такого количества и разнообразия биологических видов восстановление биосферы заняло намного более длительный период времени по сравнению с другими экологическими катастрофами фанерозоя (рис.4.10).

В настоящее время у специалистов отсутствует общепринятое мнение о причинах пермского вымирания. Рассматривается ряд возможных причин: катастрофические события (формирование трапповых формаций в Сибири, столкновение Земли с крупным астероидом, внезапный выброс метана со дна моря и др.); изменение окружающей среды (дефицит кислорода в океане, изменение океанских течений и др.).

Наиболее распространена гипотеза, согласно которой причиной пермской экологической катастрофы явилось колоссальное излияние Сибирских траппов около 250 млн. лет назад, которые могли повлечь за собой вулканическую зиму, парниковый эффект и другие климатические изменения, негативно повлиявшие на биосферу.

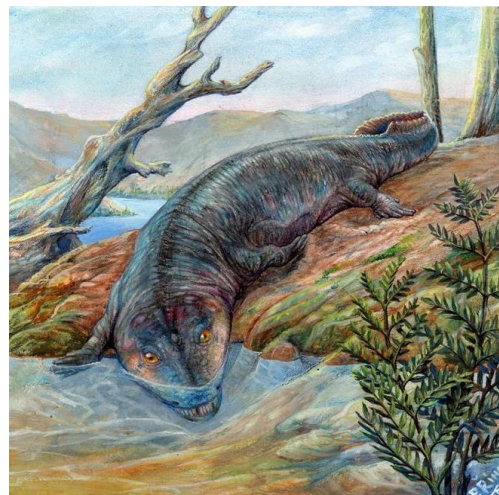


Рис.4.8. Ихтиостега.



Рис.4.9. Стегоцефал.

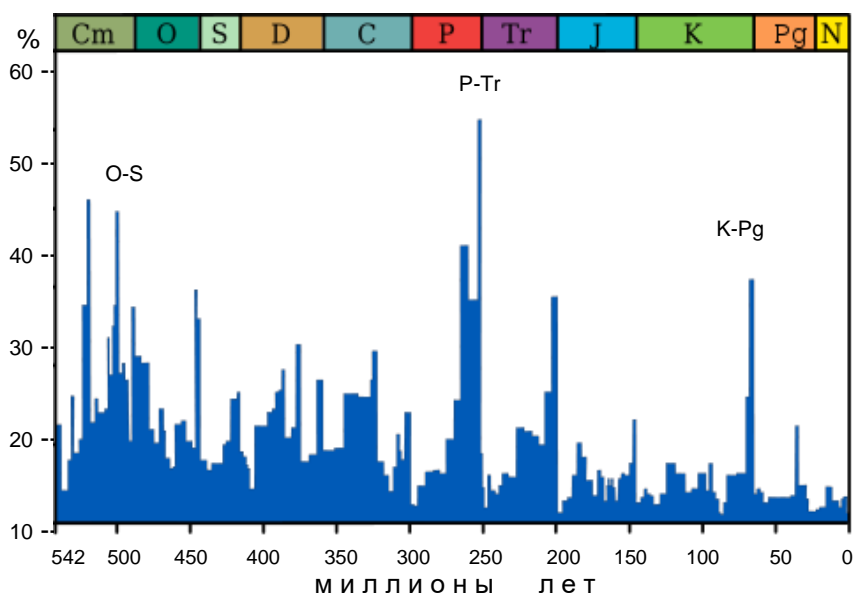


Рис.4.10. Вымирание морской фауны в течение фанерозоя. Для каждого интервала времени показан процент существовавших тогда родов, не доживших до следующего интервала (Rohde, Mülle, 2005).

Мезозойская эра

Мезозойская эра продолжалась около 186 млн. лет (252 – 66 млн. л. н.). Впервые эту эру выделил британский геолог Джон Филлипс в 1841 году. Мезозойская эра делится на три периода: триасовый (250 – 200 млн. л. н.), юрский (200 – 145 млн. л. н.) и меловой (145 – 66 млн. л. н.). Мезозой – эра тектонической, климатической и эволюционной активности. В мезозойской эре происходит формирование основных контуров современных материков и горообразование на периферии Тихого, Атлантического и Индийского океанов. Разделение суши способствовало видообразованию и другим важным эволюционным событиям. Климат был тёплым на протяжении всего временного периода, что также сыграло важную роль в эволюции и образовании новых видов животных. К концу эры основная часть видового разнообразия жизни приблизилась к современному её состоянию.

Тектоника. До начала мезозоя все материки существовали в виде единого гигантского суперконтинента – Пангеи-2. В раннем мезозое этот суперконтинент начал постепенно раскалываться. В середине мезозоя (юрский период) единый суперконтинент Пангея-2 распался на отдельные континентальные блоки, сначала на крупные (Гондвана и Лавразия), затем и на более мелкие фрагменты. Между ними образовывались мелководные моря и зарождались океаны. В верхнеюрское – нижнемеловое время Южная Америка и Африка удалялись друг от друга, и Атлантический океан становился всё шире. Антарктида, Африка, Индия и Австралия тоже начали расходиться в разные стороны, дав начало развитию Индийского океана. В течение мелового периода продолжался раскол материков и раскрытие океанов. К концу мезозоя континенты практически приняли современные очертания. Лавразия разделилась на Евразию и Северную Америку, Гондвана – на Южную Америку, Африку, Австралию, Антарктиду и Индийский субконтинент, столкновение которого с азиатской континентальной плитой вызвало интенсивный орогенез с поднятием Гималайских гор. В мезозое известны 3 периода складчатости: *раннекимммерийская* (поздний триас), *позднекимммерийская* (поздняя юра) и *ларамийская* (поздний мел).

Климат. Мезозойская эра – самый тёплый период в фанерозойской истории Земли. В течение 180 млн. лет даже в приполярных областях не было устойчивого ледяного покрова. Климат был большей частью тёплым и ровным, без существенных температурных градиентов. Большое количество парниковых газов в атмосфере способствовало равномерному распределению тепла.

Экваториальные области характеризовались тропическим климатом, со среднегодовой температурой 25 – 30°C. В средних широтах простиралась субтропическая область, далее пролегал умеренно-тёплый бореальный пояс, а приполярные области характеризовались умеренно-прохладным климатом. К окончанию мезозойской эры наступило похолодание. На полюсах сформировались ледяные шапки. Зимы становились суровее.

Фауна и флора. В мезозое вымирают гигантские папоротники, древесные хвощи, плауны. В триасе достигают расцвета голосеменные растения, особенно хвойные. В юрском периоде появляются первые покрытосеменные растения, представленные древесными формами, постепенно распространившиеся на все материки.

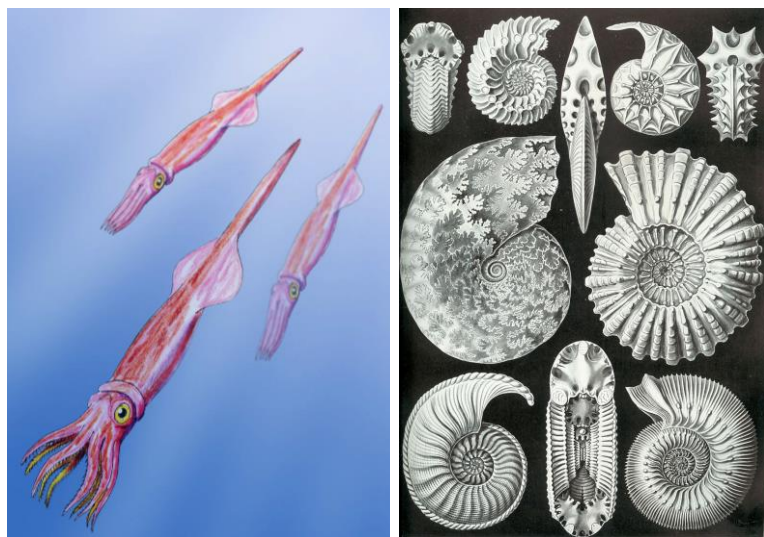


Рис.4.11. Мезозойская морская фауна: реконструкция белемнитов (слева) и различные формы раковин аммонитов (справа).

Двустворчатые моллюски вытесняют с мелководий брахиопод. Брахиоподовые ракушечники замещаются устричными. Двустворчатые моллюски заполняют все жизненные ниши морского дна. Складывается новый тип рифовых сообществ, примерно такой же, как существует сейчас. Его основу составляют появившиеся в триасе *шестилучевые кораллы*. Распространены аммониты и белемниты (рис.4.11), двустворки и морские ежи.

Среди двустворчатых моллюсков большую роль в морских экосистемах играли появившиеся в конце юры *рудисты* – моллюски, у которых одна створка была похожа на кубок, а вторая накрывала его как своеобразная крышечка (рис.4.12).

В морях нишу крупных хищников занимали рептилии: *ихтиозавры*, *плезиозавры*, *мозазавры* (рис.4.13), достигающие иногда 20-метровой длины.



Рис.4.12. Раковина рудисты.



Рис.4.13. Морские хищники мезозоя: отпечаток ихтиозавра (слева) и реконструкция мезозавров (справа).

В юрском периоде появляются летающие ящеры (*птеродактили*) и завоёвывают воздушную среду (рис.4.14). Размеры птеродактилей сильно варьировали – от мелких, величиной с воробья, до гигантских птеранодонов с размахом крыльев до 8 метров, орнитохейрусов с размахом крыльев до 12 метров. Мелкие питались насекомыми, крупные – рыбой и другими водными животными.

Среди наземной фауны в мезозое, особенно во второй его половине, господствовали динозавры.

Динозавры были чрезвычайно разнообразной группой животных. Описаны более 1000 различных видов динозавров. Хотя динозавров часто представляют как животных больших размеров, многие из них были ростом с современного человека, а некоторые не превышали размеров современных кошек. Но встречались виды действительно колоссальных размеров, длина которых измерялась первыми десятками метров, а масса достигала 50 тонн (рис.4.15).

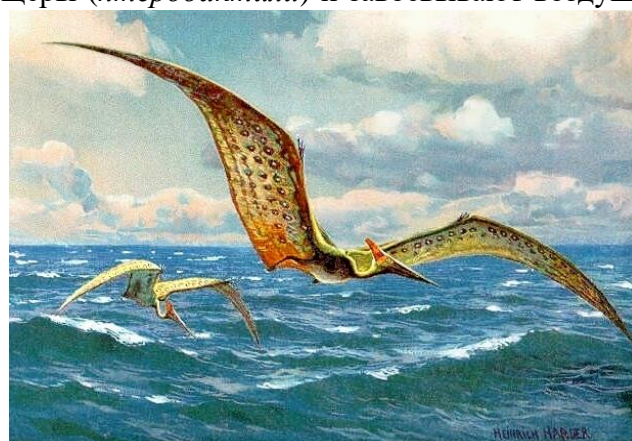


Рис.4.14. Реконструкция мезозойских летающих ящеров (птеродактилей).



Рис.4.15. Реконструкция скелетов крупнейших мезозойских динозавров: травоядного диплодока (слева) и хищного тарбозавра (справа). Палеонтологический музей РАН.

В конце мелового периода наступает похолодание, сокращается ареал околводной растительности. Вымирают растительоядные, за ними хищные динозавры. Крупные рептилии сохраняются только в тропическом поясе (крокодилы). Вследствие вымирания многих рептилий в кайнозойской эре начинается быстрое распространение птиц и млекопитающих, занимающих освободившиеся экологические ниши. Птицы, по мнению большинства палеонтологов, произошли от одной из групп динозавров. Они широко распространились по суше и дали начало множеству форм.

Млекопитающие появились еще в триасе, но не могли конкурировать с динозаврами и на протяжении 100 млн. лет занимали подчинённое положение в экологических системах того времени.

В конце мелового периода произошло самое известное и очень крупное вымирание многих групп растений и животных. Вымерли многие голосеменные растения, водные рептилии, птерозавры, все динозавры (но уцелели птицы). Исчезли аммониты, многие брахиоподы, практически все белемниты. В уцелевших группах вымерло 30 – 50 % видов.

Причины верхнемеловой катастрофы до конца не установлены. В настоящее время существует несколько гипотез, объясняющих эту экологическую катастрофу. Наиболее обоснованной и распространенной считается астероидная гипотеза Альвареса, предполагающая столкновение Земли с крупным астероидом на границе мела и палеогена. Она основана главным образом на приблизительном соответствии времени образования кратера Чиксулуб (следом от падения астероида размером порядка 10 км около 65 млн. лет назад) на полуострове Юкатан в Мексике и временем вымирания большинства видов динозавров. Эту гипотезу подтверждает так называемая «иридиевая аномалия»: повышенное содержание иридия и других платиноидов в тонком слое на границе известняковых отложений мела и палеогена, отмеченное во многих районах мира. Эти элементы очень редко встречаются в поверхностном слое Земли. В то же время, химический состав астероидов и комет отличается их повышенным содержанием.

Кайнозойская эра

Кайнозойская эра охватывает последние 66 миллионов лет геологической истории Земли. Она делится на 3 периода: палеоген (66 – 23 млн. л. н.), неоген (23 – 2.5 млн. л. н.) и четвертичный период (2.6 млн. л. н. – наст. время). Палеоген подразделяется на 3 эпохи – палеоцен (66 – 56 млн. л. н.), эоцен (56 – 34 млн. л. н.) и олигоцен (34 – 23 млн. л. н.). В неогене выделяют 2 эпохи – миоцен (23 – 5.3 млн. л. н.) и плиоцен (5.3 – 2.6 млн. л. н.). Четвертичный период подразделяют на плейстоцен (2.6 – 0.012 млн. л. н.) и голоцен (последние 12 тыс. лет).

Тектоника. В кайнозое континенты приобрели свои современные очертания. Австралия и Новая Гвинея отделились от Гондваны, двинулись к северу и, в конечном итоге, приблизились к Юго-Восточной Азии. Антарктида заняла своё нынешнее положение в районе

Южного полюса, Атлантический океан продолжал расширяться, и в конце эры Южная Америка примкнула к Северной Америке.

С конца раннего мела и до позднего эоцена океанский бассейн Тетис сокращался в размерах в результате сближения Африкано-Аравийского и Евразийского континентов. Океанская кора поглощалась в зонах предполагаемой субдукции у южного края Евразии, который был активной континентальной окраиной. С олигоценовой эпохи развитие пояса идет в обстановке столкновения, коллизии континентов, формирования складчатонадвиговых и покровных структур, образования горных хребтов, предгорных прогибов и межгорных впадин, котловин внутренних морей, проявления орогенного вулканизма. Это время соответствует периоду *альпийской складчатости*. От океана Тетис и прилегающих к нему окраинных морей с корой океанского типа сейчас сохранились лишь швы, или рубцы в виде зон с раздробленными и перемешанными глыбами гипербазитов, габбро, базальтов, яшм, кремнистых сланцев и других пород, свидетельствующих о существовании здесь в прошлом обширных бассейнов с корой океанского типа.

В кайнозое был сформирован современный облик зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану, образованы окраинные моря и островные дуги по его западной периферии. Важное геологическое значение приобрело Восточно-Тихоокеанское поднятие, в котором шло новообразование океанских плит на акватории Тихого океана. Плита Фараллон, расположенная к востоку от этого поднятия, стала поглощаться и раздробилась на плиты Кокосовую и Наска. Скорость перемещения плит в пределах Тихого океана менялась, и в момент ее увеличения вулканизм в островных дугах становился более энергичным.

В конце кайнозойской эры (плиоцен-четвертичное время) ярко проявились высокоамплитудные гляциоэвстатические колебания уровня Мирового океана, обусловленные многократным ростом и деградацией покровных ледников на суше. Благодаря этим колебаниям был сформирован современный облик береговых зон и шельфов. В пределах континентальных склонов получили развитие гигантские эрозионные долины (подводные морские каньоны), контролировавшие перенос обломочного материала из береговой зоны в глубоководные акватории.

Климат. В начале кайнозоя климат на Земле был тропическим. Практически вся Европа была покрыта вечнозелеными тропическими лесами, и лишь в северных областях произрастали листопадные растения. Но уже в олигоцене климат начал меняться в сторону похолодания. В Антарктиде, центр которой постепенно смещался к Южному полюсу, начали формироваться покровные ледники, со временем покрывшие весь материк ледяным щитом мощностью в несколько километров. Рост антарктического ледяного щита сопровождался снижением уровня Мирового океана. К концу неогена мощные оледенения охватили многие участки суши в северном полушарии.

В неоген-четвертичное время в системе ледники-океан-атмосфера получил развитие автоколебательный процесс, проявляющийся в периодически повторяющемся росте и деградации ледников на суше. Этот процесс сопровождался периодическими гляциоэвстатическими изменениями уровня Мирового океана. Особенно ярко этот процесс проявился в течение последнего миллиона лет. За этот отрезок времени установлено более десяти гляциоэвстатических циклов, в каждом из которых на суше формировались и деградировали мощные ледяные покровы, при этом уровень океана изменялся на величину порядка 130-150 метров. Столь частые и высокоамплитудные изменения уровня океана – характерная черта четвертичного периода. Подобное явление в фанерозое предполагается лишь для позднего карбона – ранней перми во время гондванского оледенения.

Фауна и флора. К началу кайнозойской эры исчезают белемниты, аммониты, наземные и морские рептилии. Их место занимают другие организмы. Среди морских беспозвоночных на первое место выдвинулись брюхоногие (гастроподы) и двустворчатые (пелециподы) моллюски. Очень важную роль в кайнозое играли простейшие – фораминиферы. Некоторые из них, такие, как нуммулиты и дискоциклины, достигали крупных размеров и

обитали на дне неглубоких хорошо прогревавшихся морей. Широкое распространение получили шестилучевые кораллы (рифостроящие организмы), иглокожие. Костистые рыбы заняли доминирующее положение в морях и океанах.

С начала палеогенового периода, когда из пресмыкающихся остались только змеи, черепахи и крокодилы, начали в изобилии распространяться млекопитающие, сначала примитивные, а затем все более высокоорганизованные их виды: кишечные, копытные, хоботные, грызуны, насекомоядные. В неогене появились медведи, носороги, быки, мастодонты, слоны, гиппарионы, в том числе и лошади, а также человекообразные обезьяны. Современный облик приняли птицы, акуловые и костистые рыбы. Среди морских млекопитающих – различные виды китообразных и ластоногих.

Растительность кайнозоя отличалась преобладающим распространением покрытосеменных форм, развитием флоры тропического и умеренного климатических поясов. В палеогеновый период тропические вечнозеленые растения – пальмы и кипарисы – произрастали в пределах средней Европы, сменявшиеся севернее более холоднлюбивой флорой – дубом, буком, платанами и хвойными.



Рис.4.16. Скелет мамонта.
Палеонтологический музей РАН.

Рубеж неогена и антропогена характеризовался развитием животного мира, приспособленного к условиям холодного климата вследствие наступивших великих четвертичных оледенений. Распространились мамонты (рис.4.16), волки, большерогие олени, медведи и др. Фауна позвоночных приобретала облик современных животных. В связи с тем, что огромные пространства были заняты сушей с травянистой растительностью, исключительного развития достигли насекомые.

Эволюцию органического мира в кайнозое увенчало появление человека. Предок человека – дриопитек существовал около 20 млн. лет назад и дал начало рамапитеку, обитавшему примерно 10 – 12 млн. лет назад. Первый гоминид – австралопитек появился 4.5 млн. лет назад. Это было существо, передвигавшееся на двух ногах. Около 1 млн. лет назад человек уже использовал простейшие орудия в виде ручных рубил, а далее эволюция кроманьонцев (40 – 35 тыс. лет назад) привела к появлению современного человека, владевшего огнем и каменными орудиями. К середине голоцена появились первые цивилизации.

Ниже в табличной форме приведена Международная геохронологическая шкала и перечислены некоторые важнейшие события в истории Земли и эволюции органического мира для отдельных отрезков геологического времени.

1. Краткая сводка глобальных событий в истории Земли в фанерозое

Эон (эпохема)	Эра (группа)	Период (система)	Эпоха (отдел)	Начало, млн. лет назад	Основные события
Фанерозой	Кайнозой	Четвертичный	Голоцен	0.012	Конец последнего ледникового периода. Возникновение цивилизаций
			Плейстоцен	2.6	Многочисленные оледенения суши. Гляциостатические колебания уровня океана.
		Неогеновый	Плиоцен	5.3	Появление мамонтов, волков, большерогих оленей, медведей и первых гоминид - австралопитеков.
			Миоцен	23	Раскрытие Красного моря. Появление слонов, носорогов, мастодонтов, лошадей и человекообразных обезьян.
		Палеогеновый	Олигоцен	34	Альпийская складчатость. Начало покровного оледенения Антарктиды.
			Эоцен	56	Закрытие океана Тетис. Расцвет наземных и морских млекопитающих.
			Палеоцен	66	Господство покрытосемянных растений. Появление костистых рыб и примитивных млекопитающих. Расцвет брюхоногих и двустворчатых моллюсков.
		Мезозой	Меловой	145	Ларамийская складчатость. Расцвет наземных и морских рептилий. Массовое вымирание видов. Иридиевая аномалия.
			Юрский	201	Распад Пангеи-2. Позднекимерийская складчатость. Расцвет динозавров и птеродактелей. Появление сумчатых млекопитающих и первых птиц. Расцвет головоногих моллюсков, появление шестилучевых кораллов.
	Триасовый		252	Раннекимерийская складчатость. Первые динозавры и яйцекладущие млекопитающие.	
	Палеозой	Пермский	299	Образование Пангеи-2. Излияние Сибирских трапов. Массовое вымирание видов (трилобитов, четырех лучевых кораллов и др.).	
		Каменноугольный	359	Появление деревьев и пресмыкающихся. Расцвет стегоцефалов. Столкновение Гондваны и Евро-Америки. Гондванское оледенение.	
		Девонский	419	Первые голосемянные растения. Появление земноводных (ихтиостеги). Начало Герцинской складчатости.	
		Силурийский	443	Выход органической жизни на сушу. Ордовикосилурийское вымирание.	
		Ордовикский	485	Образование озонового слоя. Начало Каледонской складчатости.	
		Кембрийский	541	Массовое появление в океане новых групп организмов с минеральным скелетом.	

2. Краткая сводка глобальных событий в истории Земли в докембрии

Докембрий	Прогерозой	Неопрогерозой	Эдиакарий	~635	Разделение Паннотии на континенты Гондвана, Лавразия и мини-континенты. Эдиакарская фауна.
			Криогений	~720	Крупномасштабные оледенения Земли. Начало формирования суперконтинента Паннотия. Байкальская складчатость.
			Тоний	1000	Начало распада суперконтинента Родиния. Хайнаньская биота.
		Мезопрогерозой	Стений	1200	Формирование суперконтинента Родиния. Появление водных растений и грибов.
			Эктазий	1400	Первые многоклеточные организмы (красные водоросли)
			Калимий	1600	Распад суперконтинента Колумбия. Формирование осадочного чехла на кратонах.
		Палеопрогерозой	Статерий	1800	Появление эукариот. Формирование суперконтинента Колумбия (Пангея-1). Гудзонская складчатость.
			Орозирий	2000	Селецкая складчатость. Атмосфера Земли стала окислительной. Столкновение Земли с двумя крупными астероидами.
			Риасий	2300	Завершение гуронского оледенения. Внедрение гигантских интрузий (Бушвельдский комплекс и др.). Появления ядра у живых клеток.
			Сидерий	2500	Пик проявления железистых кварцитов (джеспилитов). Кислородная катастрофа. Начало Гуронского оледенения.
		Архей	Неоархей	2800	Беломорская складчатость. Формирование континентальной коры. Появление фотосинтезирующих цианобактерий.
			Мезоархей	3200	Раскол Ваальбары. Начало тектоники плит. Интенсивное формирование континентальной коры. Появление цианобактерий.
	Палеоархей		3600	Завершение формирования ядра Земли, возникновение геомагнитного поля. Формирование суперконтинента Ваальбара	
	Эоархей		4000	Образование атмосферы и гидросферы. Появление анаэробных одноклеточных организмов (прокариотов).	
		Катархей	~4600	Формирование Земли и Луны	